

UNIVERSITÉ DE TOURS UNIVERSITÀ DI PAVIA

ÉCOLE DOCTORALE : Humanités & Langues – H&L

Laboratoire : CESR – Ricercar

DIPARTIMENTO DI MUSICOLOGIA E BENI CULTURALI

THÈSE présentée par :

Nicoletta ANDREUCCETTI

soutenue le : XX mois en lettres 200x

pour obtenir le grade de : **Docteur de l'Université de Tours et Dottore di ricerca de l'Università di Pavia**

Discipline / Spécialité : Musicologie / Scienze del testo letterario e musicale

Comporre con i modelli fisici tra astrazione e realismo

Strumenti, pratiche e linguaggi del virtuale: una ricognizione e tre casi di studio (Lupone, Kojs, Lanza)

Composer avec des modèles physiques entre abstraction et réalisme

Instruments, pratiques et langages du virtuel : une enquête et trois études de cas (Lupone, Kojs, Lanza)

THÈSE dirigée par :

M. CANGUILHEM Philippe
Mme PUSTIJANAC Ingrid

Professeur, Université de Tours
Professeure, Università di Pavia (Italie)

RAPPORTEURS :

Mme SERAFIN Stefania
M. TIFFON Vincent

Professeure, Université de Aalborg (Danemark)
Professeur, Aix-Marseille Université

JURY :

M. CANGUILHEM Philippe
Mme PUSTIJANAC Ingrid
Mme SERAFIN Stefania
M. TIFFON Vincent, président

Professeur, Université de Tours
Professeure, Università di Pavia (Italie)
Professeure, Université de Aalborg (Danemark)
Professeur, Aix-Marseille Université

INVITÉ :

M. LANZA Mauro

Universität der Künste, Berlin (Allemagne)

Mots clés

modèles physiques, instruments et gestes virtuels, composition assistée par ordinateur

Keywords

physical models, virtual instruments and gestures, computer-aided composition

Remerciements

Innanzitutto, porgo un sentito ringraziamento ai miei direttori di tesi Philippe Canguilhem e Ingrid Pustijanac. Al prof. Canguilhem per aver accolto la mia proposta di tesi di dottorato e per i preziosi consigli che hanno facilitato e arricchito la stesura del mio lavoro, e alla prof.ssa Pustijanac per l'attenzione, la cura e gli illuminanti suggerimenti con cui ha seguito ogni fase della realizzazione della mia ricerca: senza il loro contributo non sarei giunta a conclusione di un iter certamente non semplice, né privo di difficoltà. Desidero, inoltre, ringraziare Michelangelo Lupone, Mauro Lanza e Juraj Kojš con cui mi sono confrontata su aspetti legati alla loro produzione musicale. Un ringraziamento va anche al prof. Marco Ligabue con il quale ho iniziato a lavorare su una tale tematica per la mia tesi di Master al Conservatorio Cherubini di Firenze. Ringrazio pure Giorgio Sancristoforo che ha suscitato in me l'interesse per la modellizzazione fisica. Infine, un ringraziamento particolare va al mio maestro di composizione, Ivan Fedele, il quale, durante gli anni della mia formazione, mi ha sempre sollecitato ad approfondire il mondo della composizione elettroacustica.

Résumé

La recherche sur la synthèse sonore par modèles physiques s'est particulièrement développée au cours des cinquante dernières années, produisant une large gamme d'algorithmes et d'implémentations, capables d'offrir aux musiciens, grâce à la modélisation directe du mécanisme de production du son, des outils de plus en plus efficaces et sophistiqués pour contrôler et produire des sons nouveaux et traditionnels. Partant de l'hypothèse de la non-neutralité du médium technologique et de son détachement du monde de l'instrumentalité traditionnelle, le présent travail vise à étudier les processus compositionnels qui ont émergé de l'utilisation d'instruments virtuels.

Le premier chapitre étudie les formalismes et les techniques de modélisation, processus fondamentaux dont découle la nature même des instruments virtuels, contribuant de manière décisive à féconder, structurer, voire rendre concevables les processus de création. Le deuxième chapitre est consacré à un examen approfondi des modèles physiques les plus significatifs, étudiés non pas tant dans le domaine "direct" de la programmation, mais plutôt dans le domaine "dérivé" des pratiques musicales, contextualisées par une référence constante à la littérature musicale pertinente. Le troisième chapitre, enfin, tentera d'éclairer la dialectique instrument/geste virtuel-processus compositionnel, en soulignant comment l'instrumentalité entre dans la sphère de l'idéation et de l'articulation linguistique avec différents degrés de distanciation de la réalité, jusqu'à l'abstraction totale. Dans la constitution d'un espace compositionnel "autre", l'abstraction et le réalisme représentent les extrêmes d'un continuum, interprétable selon le concept de "plausibilité du son", dans lequel toutes les compositions analysées finissent par graviter, théâtre d'une action métaphorique qui se déroule selon une proportionnalité inverse : s'intensifiant dans la tension vers l'abstrait et se réduisant dans le retour au concret du réel, comme en témoigne l'analyse des trois études de cas, basées sur les œuvres de Michelangelo Lupone, Juraj Kojš et Mauro Lanza.

Nous avons donc tenté d'analyser notre objet d'étude à la lumière des interrelations continues qui rendent significative la "restitution phénoménologique" de l'univers virtuel en tant que système complexe, "suspendu" entre abstraction et réalité, entre formalisation scientifique et artistique, entre langage technique et musical.

Résumé en anglais

The research on sound synthesis by means of simulated physical models has been particularly developed in the last fifty years, producing a wide range of algorithms and implementations, able to offer musicians, thanks to the direct modelling of the mechanism of sound production, increasingly effective and sophisticated tools to control and produce both new and traditional sounds. Starting from the assumption of the non-neutrality of the technological medium, and of its detachment from the world of traditional 'instrumentality', the present work intends to investigate the compositional processes that have emerged from the use of virtual instruments.

The first chapter investigates the formalisms and modelling techniques, fundamental processes from which the very nature of virtual instruments derives, contributing in a decisive way to fecundate, structure, and even render conceivable the very processes of creation. The second chapter is dedicated to an extensive examination of the most significant physical models, investigated not so much in the 'direct' domain of programming, but rather in the 'derived' domain of musical practices, contextualised through constant reference to the relevant musical literature. The third chapter, finally, will try to illuminate the dialectic instrument/virtual gesture-compositional process, highlighting how 'instrumentality' enters the sphere of ideation and linguistic articulation with different degrees of distancing from reality, up to total abstraction. Within the constitution of an 'other' compositional space, abstraction and realism represent the extremes of a continuum, interpretable according to the concept of 'plausibility of sound', in which all the compositions analysed end up gravitating, the theatre of a metaphorical action that unfolds according to an inverse proportionality: intensifying in the tension towards the abstract and reducing in the return to the concreteness of the real, as also witnessed by the analysis of the three case studies, based on the works of Michelangelo Lupone, Juraj Kojš and Mauro Lanza.

Thus, an attempt was made to analyse our object of study in the light of the continuous interrelationships that make the 'phenomenological restitution' of the virtual universe significant as a complex system, 'suspended' between abstraction and reality, between scientific and artistic formalisation, between technical and musical language.

INDICE

Résumé	4
Résumé en anglais	5
Introduzione	9
Capitolo I	
<i>La modellizzazione fisica per la sintesi del suono</i>	
1.1 Introduzione	23
1.2 Dal modello del segnale al modello della sorgente	25
1.2.1 Il modello del segnale	27
1.2.2 Il modello della sorgente	39
1.3 Le tecniche della modellizzazione fisica e le implementazioni per la composizione musicale	52
1.3.1 Il metodo classico (o analisi numerica)	57
1.3.2 L'approccio modulare di interazione di massa: Cordis-Anima	59
1.3.2.1 Genesis: un ambiente per la creazione musicale	62
1.3.3 L'approccio modale	73
1.3.3.1 Modalys: un sintetizzatore per il compositore-liutaio-performer	78
1.3.3.2 Physically Informed Stochastic Models (PhISM)	83
1.3.4 L'approccio per guida d'onda	85
1.3.5 Synthesis ToolKit (STK)	94
1.3.6 La modellizzazione fisica in FAUST	97
1.4 Conclusioni	102
Capitolo II	
<i>Strumenti virtuali e prassi esecutive: un excursus nel repertorio</i>	
2.1 Introduzione	111

2.2 Gli strumenti virtuali: dall'imitazione, estensione e ibridazione del reale alla generazione dell'astratto 116

2.2.1 Processi di trasformazione del reale: gli strumenti virtuali, estesi e ibridi 120

2.2.1.1 Corda di Metallo 135

2.2.1.2 Celletto 141

2.2.1.3 Corde virtuali pizzicate 144

2.2.1.4 Whirlwind e HIRL 146

2.2.1.5 Oxygen Flute 151

2.2.1.6 SonoMorphis 156

2.2.1.7 Exbow – Metasax 160

2.2.1.8 Singing bowl 163

2.2.1.9 Maraca 167

2.2.1.10 Windchimes e Rbow 171

2.2.1.11 Cyber-shakers 175

2.2.1.12 Orchid's Hybrid Cyberinstruments 180

2.2.2 Gli strumenti virtuali nel dominio dell'astratto 183

2.2.2.1 Beater, Triangle, Snake e Domino in Genesis 195

2.2.2.2 Cyber-bell in Genesis 203

2.2.2.3 Gong, piatti, corde, flussi di particelle in Hélicanthe 206

2.3 Conclusioni 215

Capitolo III

Comporre con gli strumenti virtuali: dalla virtualizzazione di gesto e strumento al physical thinking

3.1 Introduzione 225

3.2 Comporre nel dominio del plausibile 229

3.3 Gestualità estese, ibride e astratte 235

3.4 Spazi compositivi tra il concreto e l'astratto 247

3.5 Tre casi di studio

3.5.1 Corda di Metallo di Michelangelo Lupone: una ricerca musicale e scientifica 254

3.5.2 <i>La Cyber action composition di Juraj Kojš</i>	265
3.5.3 <i>Tra formalizzazione e imprevedibilità: Mauro Lanza e la poetica del 'side effect'</i>	286
3.6 Conclusioni	314
<i>Conclusioni generali</i>	323
Appendice al cap. II	
<i>Repertorio delle composizioni create con strumenti virtuali attraverso la sintesi per modelli fisici</i>	327
<i>Bibliografia</i>	347

Introduzione

Fino alla fine degli anni Settanta, nell'ambito dell'acustica musicale, la pratica della modellizzazione fisica (*Physical Modelling*, PM) consisteva nella ricerca di una migliore comprensione dei meccanismi degli strumenti reali, attraverso la progettazione di modelli precisi e complessi. La simulazione veniva principalmente utilizzata per studiare la validità del modello di una specifica struttura sonora, confrontandone i risultati con le misure della struttura reale, attraverso sia l'analisi uditiva, sia quella del segnale. Da allora, si sono sviluppate ricerche con finalità e usi più orientati alla musica, che, a partire dagli anni Novanta, vennero definite, nel loro complesso, con l'espressione 'Modellizzazione basata sulla fisica' (*Physically-Based Modeling*, PBM) o sintesi, in opposizione alla modellizzazione fisica tradizionale.¹ Pur condividendo obiettivi comuni a quest'ultima, la PBM mira a trovare appropriate regole fisiche, algoritmi modulari riutilizzabili, linguaggi basati sulla fisica o strumenti integrati volti ad amplificare le potenzialità creative del musicista, in termini sia di qualità dei suoni, sia della loro usabilità, con il fine ideale di costruire strumenti virtuali eseguibili al pari degli strumenti reali.

Poiché l'approccio adottato dalla presente ricerca si situa all'interno di questo orizzonte, la sfida consiste nel cercare di riconoscere dove gli obiettivi della PM e della PBM si sovrappongano e, laddove siano focalizzati sui risultati musicali, nel dare priorità ai dettagli collegati ai timbri, ai comportamenti e alle loro interazioni. Così, in questo scritto, l'espressione 'modellizzazione fisica' si riferirà, senza ulteriori specificazioni, a quei procedimenti caratterizzati dall'enfasi sulla modellazione delle proprietà più preminenti e significative di alcuni meccanismi generatori di suono del mondo reale da cui viene estratto il segnale sonoro. In ogni caso, la modellizzazione fisica – rispetto all'approccio di elaborazione del segnale, focalizzato sulla modellizzazione delle proprietà acustiche del suono, così come viene percepito – consiste nel simulare la meccanica della produzione sonora attraverso l'imitazione del comportamento

¹ NICOLAS CASTAGNÉ – CLAUDE CADOZ – JEAN-LOUP FLORENS, *Physically-Based Modeling and Music vs. Physical Modeling and Acoustics*, in *International Congress on Acoustics 2004*, Kyoto 2004, pp. [1-5]; VESA VALIMÄKI, *Physics-Based Modeling of Musical Instruments*, «Acta Acustica united with Acustica», XC (2004), pp. 611-617.

dell'oggetto che produce un determinato suono, riconducendo, in tal modo, alla fisicità del mondo materiale costituito dagli oggetti che emettono il suono e dai mezzi nel quale quest'ultimo si propaga.

Grazie, infatti, al poter progettare la meccanica del suono nel digitale, il progettista e/o il musicista accedono alla struttura interna degli oggetti/strumenti fisici virtuali, modellando direttamente l'interazione di semplici strutture meccaniche che 'per natura' restituiscono sequenze e *texture* sonore con proprietà interne organiche. In tal senso, i musicisti possono realizzare condizioni di emissione e di controllo del suono che, pur essendo irrealizzabili nel reale, continuano a restare nell'ambito di modalità intuibili o immaginabili, in una rappresentazione mentale fisica del suono, anziché in una rappresentazione mentale astratta, dando vita a un *corpus* di liuteria digitale che ridefinisce la natura stessa del concetto di strumento.

Nell'analizzare la letteratura che impiega i modelli fisici, il medium tecnologico, infatti, si conferma non essere neutrale, né appartenere al mondo della 'strumentalità' tradizionale, ma, in quanto portatore di valori, si pone in dialogo profondo con l'identità stessa dell'opera, contribuendo ad un reciproco disvelamento che costruisce realtà nuove. Così il 'mezzo' entra nel 'fine' ed, inversamente, il fine si costituisce nel mezzo, attraverso una relazione che trascende ogni polarizzazione dualistica e in cui il 'cosa' corrisponde al 'come'.

Poiché strumento e pensiero compositivo si ridefiniscono reciprocamente nel rendere concepibili e realizzabili i processi stessi della creazione, ne consegue la necessità di un'analisi accurata della natura del contributo specifico che gli strumenti virtuali apportano alla ridefinizione dell'agire compositivo all'interno di tale dialettica. Scopo della presente ricerca sarà, dunque, l'indagare l'interrelazione tra i formalismi del dominio digitale, che costruiscono il modello, la messa in atto di tale oggetto, che 'diviene' strumento musicale, e i processi compositivi.

Sebbene, il periodo preso in esame si estenda su di un arco temporale che inizia con la sperimentazione delle prime tecniche della modellizzazione, negli anni Settanta, fino ad arrivare ai nuovi linguaggi dell'oggi, per testimoniare tale interrelazione, la ricerca si è focalizzata sulla parte centrale di tale lasso cronologico – all'incirca dalla metà degli anni Ottanta fino al primo decennio del XXI secolo – in cui i formalismi della modellizzazione fisica sono ormai maturi per essere utilizzati in ambito creativo. In tal

senso, ci si è limitati ad affrontare in maniera specifica nei casi di studio esperienze compositive comunque legate all'utilizzo di partiture, sebbene di diversa natura, lasciando a studi ulteriori una più accurata lettura delle soluzioni più marcatamente improvvisative, o, ancora, legate all'utilizzo, a fini creativi, di ambienti virtuali immersivi ed interattivi.

Data la particolare natura della presente ricerca, l'individuazione del corpus delle fonti e della letteratura secondaria, appare particolarmente problematico. Per tale motivo si definiranno, in dettaglio, la tipologia delle fonti primarie e della letteratura secondaria per ciascun capitolo.

Nel primo capitolo, dedicato all'analisi dello sviluppo delle tecniche di modellizzazione fisica, le fonti primarie sono costituite dai contributi – normalmente redatti da coloro che progettano i modelli, talora in collaborazione con i musicisti – che riguardano sostanzialmente la formalizzazione di specifiche soluzioni di progettazione. Si tratta di studi molto tecnici e focalizzati su casi delimitati e circoscritti di modellizzazione, pubblicati solitamente negli atti dei convegni delle associazioni internazionali di computer music, oppure nei reports dei vari centri di ricerca CCRMA; IRCAM; ACROE. Sulle guide d'onda fondamentali si rivelano i contributi di chi le ha sviluppate come Julius O. Smith III, i cui scritti testimoniano l'interazione da lui operata con l'algoritmo Karplus-Strong e McIntyre-Schumacher-Woodhouse; sulla sintesi modale implementata in Mosaic, poi confluito in Modalys, di Joseph Dereck Morrison e Jean-Marie Adrien; su *PhISM*, di Perry Cook; sul paradigma di interazione di massa, dei ricercatori del centro ACROE, diretto da Claude Cadoz; sulla Synthesis ToolKit, di Cook; sul linguaggio di programmazione Functional AUdio STreaming (FAUST), di Smith III e di Romain Michon.² Ovviamente, questi costituiscono solo i primi esempi, da un punto di vista cronologico, di un vasto corpus di fonti, che arriva fino ai giorni nostri, al quale si farà puntuale riferimento nel corso del relativo capitolo.

A queste fonti primarie si aggiunge un significativo, quanto limitato, gruppo di fonti secondarie che testimoniano la volontà di una riflessione di più ampio respiro sulla natura dei differenti approcci alla modellizzazione fisica, tra cui si segnalano i contributi di Vesa Välimäki, Gianpaolo Borin et altri, Stefan Bilbao, Eduardo Reck Miranda, Curtis

² Per le indicazioni dettagliate su tali contributi si rimanda al capitolo in questione.

Roads, Cadoz e Nicolas Castagné, nonché i contributi di Jean-Claude Risset sulle tematiche relative alla psicoacustica.³

Per quanto che riguarda il secondo capitolo, le fonti primarie sono costituite ancora dalla medesima tipologia utilizzata per il primo capitolo, indagata, questa volta più sul versante delle pratiche che scaturiscono dalle diverse tipologie di modellizzazione, a cui si uniscono una gamma eterogenea di fonti costituite dalle partiture dei brani, laddove utilizzate, dai programmi di sala, dalle comunicazioni personali degli autori. A queste fonti si aggiungono articoli scritti direttamente dagli autori (Chris Chafe, Perry Cook, Matthew Burtner, Castagné e Cadoz), oppure in simbiosi tra ricercatori che progettano il modello e compositori che lo utilizzano (Juraj Kojs-Stefania Serafin, Burtner-Serafin), e tesi di dottorato in cui gli autori/compositori parlano delle proprie opere (Kojs, Dan Trueman).⁴

La fonti secondarie sono costituite dai primi contributi, seppure assai parziali, che mettono in relazione le tecniche con la letteratura, tra cui si segnala, qui, un breve articolo di Chafe,⁵ e il fondamentale contributo sulla classificazione degli strumenti virtuali ad opera di Chafe, Kojs e Serafin,⁶ classificazione che è stata utilizzata anche per strutturare il database della letteratura musicale, di cui si parlerà dopo. In questo senso, la nostra lettura del ruolo e della funzione di tali strumenti è stata contestualizzata facendo ricorso alla metodologia della *critical organology*,⁷ che ridefinisce i criteri dell'organologia tradizionale aprendosi allo studio di ogni tipologia di *sounding object*.⁸ Per maggiori dettagli su tali aspetti si rimanda all'introduzione del secondo capitolo.

Per quanto che riguarda il terzo capitolo, le fonti primarie sono costituite dalle partiture delle opere trattate, e dagli articoli e dagli interventi, sotto varia forma, dei compositori sul proprio lavoro, tra cui quelli di Kojs, Mauro Lanza, Michelangelo Lupone, Cadoz. Le fonti secondarie sono state costituite da quegli interventi che hanno

³ Per le indicazioni dettagliate su tali contributi si rimanda al capitolo in questione.

⁴ Per le indicazioni dettagliate su tali contributi si rimanda al capitolo in questione.

⁵ CHRIS CHAFE, *Case Studies of Physical Models in Music Composition*, in *Proceedings of 18 The International Congress on Acoustics*, Kyoto 2004, [5 pp.].

⁶ KOJS – SERAFIN – CHAFE, *Cyberinstruments via Physical Modeling Synthesis: Compositional Applications*, «Leonardo Music Journal», XVII (2007), pp. 61-66.

⁷ JOHN TRESCH – EMILY I. DOLAN, *Toward a New Organology: Instruments of Music and Science*, «Osiris», XXVIII (2013), pp. 163-185.

⁸ RENATO MEUCCI, *Organologia: definizione e contenuti di una recente ricerca*, in *Il museo degli strumenti Musicali del Conservatorio Luigi Cherubini*, a cura di Mirella Branca, Sillabe, Livorno 1999, pp. 108-119.

contribuito a definire il quadro metodologico e interpretativo di riferimento per la concettualizzazione di aspetti inerenti il pensiero compositivo, nonché la fruizione delle opere costruite con i modelli fisici: il concetto di legame con la fonte, di Denis Smalley;⁹ l'*embodied cognition*, di Marc Leman¹⁰ e Arnie Cox;¹¹ il concetto di *plausibilità*, di Castagné; il processo di metaforizzazione, di Cadoz. Tali concetti formulati in relazione a oggetti particolari sono stati, al tempo stesso, ridefiniti e rimodellati in funzione di una mia rilettura personale e complessiva del fenomeno attraverso cui l'atto compositivo viene riconsiderato alla luce delle tecniche di modellizzazione fisica, oggetto di questo capitolo conclusivo.

Se da un lato, come si è visto, la ricerca scientifico-informatica sulla modellizzazione fisica risulta essere un corpus assai vasto e in continua ridefinizione, allo stato attuale della letteratura esistente appare essere assai limitato il contributo storico-musicologico e analitico relativo al repertorio dei modelli fisici, né, peraltro, appare sufficientemente sviluppata la riflessione estetica conseguente. A questo proposito, oltre ai contributi già segnalati in precedenza, che affrontano tali questioni in maniera assai parziale e indiretta, si segnalano la tesi dottorale di Aline Hufschmitt,¹² la quale contiene un excursus delle tecniche fino agli 2000 con delle brevi interviste a compositori su brani specifici, e la tesi di master di Romain Michon¹³ che presenta alcuni brani che utilizzano la sintesi per guida d'onda. Le tesi di Hans Tutschku¹⁴ e di Michaël Dzjaparidze¹⁵ sono incentrate su un portfolio di composizioni degli autori stessi, come

⁹ DENIS SMALLEY, *La spettromorfologia: una spiegazione delle forme del suono (I)*, «Musica/Realtà», L (1996), pp. 121-137.

¹⁰ MARC LEMAN, *Embodied Music Cognition and Mediation Technology*, The MIT Press, Cambridge, MA 2008; ID. – PIETR-JAN MAES, *Music Perception and Embodied Music Cognition*, in *The Routledge Handbook of Embodied Cognition*, Routledge, London 2014, pp. 81-88.

¹¹ ARNIE COX, *Music and Embodied Cognition: Listening, Moving, Feeling, and Thinking (Musical Meaning and Interpretation)*, Indiana University Press, Bloomington 2016.

¹² ALINE HUFSCMITT, *La Synthèse Par Modeles Physiques*, Ph. D. thesis, Université de Paris Sorbonne (Paris IV), 2000.

¹³ ROMAIN MICHON, *Modélisation physique d'instruments de musique par guides d'ondes numériques – enjeux, environnements existants, implémentation, perfectionnements et utilisation*, Master thesis, Université Jean Monnet, Saint-Etienne 2012.

¹⁴ HANS TUTSCHKU, *Portfolio of Compositions*, Ph.D. thesis, The University of Birmingham, 2003.

¹⁵ MICHAËL DJAPARIDZE, *Exploring the Creative Potential of Physically Inspired Sound Synthesis*, Ph.D. thesis, Queen's University of Belfast, 2015.

pure le tesi di dottorato di Olivier Tache¹⁶ e Giuseppe Gavazza,¹⁷ che illustrano propri brani composti utilizzando il linguaggio Cordis-Anima.

La tesi di Kojs, infine, sebbene anch'essa in gran parte incentrata sulla discussione delle proprie composizioni, sviluppa delle interessanti considerazioni sui procedimenti percettivi, a partire dall'applicazione alla dimensione uditiva della teoria della percezione ecologica di James J. Gibson,¹⁸ di cui si è tenuto conto, e introduce il database delle composizioni che usano i modelli fisici.

Essendo, infatti, uno degli obiettivi della presente ricerca lo studio sistematico delle opere realizzate mediante la tecnologia descritta, una prima fase è consistita nella mappatura del repertorio. A questo proposito, un primo tentativo di censimento è stato prodotto, come già accennato, da Kojs, il quale ha iniziato a catalogare un corpus di composizioni che usano i modelli fisici, fino al 2008. Il database – che contiene informazioni precise sulla metodologia di sintesi usata per ciascuna composizione, sulla tipologia di strumento modellizzato, e sull'organico – pur nei limiti della tracciabilità dei dati, è stato integrato, sviluppato e ampliato cronologicamente dalla scrivente. Tale censimento ha confermato, su un più ampio arco temporale, la fortuna di alcune tecniche di più facile implementazione e di altre, invece, più votate ad essere utilizzate, di preferenza, nei centri di ricerca, nonché la fortuna di implementazioni di sempre più facile accesso per l'utilizzo creativo proprio dei musicisti. I risultati di questa integrazione sono esposti nell'appendice al capitolo II.

La stesura del database con le composizioni in cui è presente la tecnica della sintesi per modelli fisici ha messo in evidenza, sin da subito, da una parte l'eterogeneità dei casi di studio, dall'altra alcune linee comuni. Così, si è rivelato necessario, in primo luogo, una disamina sistematica della letteratura scientifica inerente la sintesi per modelli fisici, che ha testimoniato, da un lato, la mancanza di una sistematica riflessione sulle implicazioni compositive nell'uso di tali nuovi strumenti, e, dall'altro, la mancanza di uno studio complessivo della ridefinizione dei processi percettivi e fruitivi promossi

¹⁶ OLIVIER TACHE, *Conception d'un instrumentarium pour la creation musicale a l'aide des modeles physiques Cordis-Anima. Modelisation et simulation*, Ph. D. thesis, Institut Polytechnique de Grenoble, Grenoble 2008.

¹⁷ GIUSEPPE GAVAZZA, *De Rerum Natura: Physical Modelling as a Tool for Musical Composition*, Ph. D. thesis, ICA-ACROE, Institut Polytechnique de Grenoble, Grenoble 2017.

¹⁸ JAMES J. GIBSON, *The Ecological Approach to Visual Perception*, Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, NJ 1986.

dall'implementazione creativa degli strumenti virtuali nei procedimenti compositivi: ciò che appare essere pressoché inesistente è, dunque, la ricostruzione di un quadro d'insieme che costituisce, invece, uno degli obiettivi primari del presente lavoro.

Si tratterà, dunque, vista la natura dispersa e fortemente eterogenea delle fonti, di approntare, in primo luogo, una ricognizione che delimiti il nostro oggetto di studio, articolando tale messa in forma secondo tre direttrici interagenti: le tecniche di modellizzazione usate nei processi di creazione del modello, la ricaduta organologica e performativa del loro costituirsi in corpus di strumenti e la ricostruzione del repertorio correlato. Questi tre ambiti pur potendo apparire del tutto differenti costituiscono, per la nostra ricerca, un unico oggetto, dalle diverse sfaccettature, articolantesi idealmente in tre temporalità organicamente correlate, che segnano il loro triplice inverarsi: modello, strumento, opera.

Se da un lato, infatti, appare necessario indagare, nel profondo, le proprietà emergenti del modello che scaturiscono dalle diverse tecniche di modellizzazione, così come è necessario indagare la natura specifica delle potenzialità performative e del repertorio che ne deriva, dall'altro lato, la sfida di questa ricerca consiste nell'individuare la trama che contesse la complessità di tale quadro d'insieme, in cui ogni aspetto è organicamente interrelato. Rifuggendo da ogni logica di semplificazione e di separazione, si cercherà di proporre percorsi di indagine non di tipo centrifugo, ma centripeto. Il nostro oggetto di studio verrà, così, analizzato alla luce degli scambi continui, delle continue interrelazioni che rendono significativa la sua restituzione fenomenologica in quanto sistema complesso, per sua natura essenzialmente un ibrido tra digitale e analogico, tra virtuale e reale, tra formalizzazione scientifica e artistica, tra linguaggio tecnico e musicale.

Nel primo capitolo si è cercato di indagare il contesto e le soggiacenti problematiche che hanno reso possibile l'integrazione delle tecniche di modellizzazione fisica nell'ambito musicale, mediante processi di mutua ridefinizione e di reciproco affinamento che ne hanno esaltato la ricaduta performativa. Si è proceduto, così, a delineare le peculiarità e lo sviluppo dell'approccio per modelli fisici nel più ampio contesto della ricerca musicale a partire dagli anni Sessanta, un momento cruciale in cui il delinearsi del paradigma della sorgente fondato sulla rappresentazione del meccanismo di produzione del suono, la causa piuttosto che l'effetto. Tale sviluppo si

incrocia con le problematiche relative alla ridefinizione del timbro attraverso le categorie della percezione, problematiche peraltro già presenti nel dominio della musica elettronica pura, e che il passaggio stesso dall'analogico ai linguaggi di sintesi digitali aveva, a sua volta, ridefinito. La consapevolezza della relazione tra il modo in cui la nostra percezione riceve le proprietà del suono e le causalità da cui queste ultime promanano, diverrà, dunque, tra gli anni Sessanta e Settanta, il fondamento stesso della sintesi del suono basata sulla fisica.

Dall'indagine della specificità della natura della modellizzazione fisica nell'ambito musicale, si è, così, proceduto a delinearne i principali metodi, focalizzandosi, per ciascuno di essi, sulle diverse peculiarità di costruzione del modello, al fine di evidenziare la rappresentazione concettuale sottesa al modello stesso, a sua volta rispecchiantesi, come si vedrà in dettaglio nel secondo capitolo, nella diversa identità degli strumenti. L'excursus storico di tali formalismi ha permesso, inoltre, all'interno del naturale intreccio tra le prassi della progettazione del modello e i processi della creazione musicale, di ricostruirne le modalità di sviluppo e di consolidamento, tra la fine degli anni Settanta e i primi anni Novanta, e il progressivo passaggio, nei decenni successivi, dai laboratori dei centri di ricerca agli studi privati dei compositori. Tale passaggio si è verificato grazie al proliferare dell'implementazione delle tecniche all'interno di ambienti di programmazione dedicati alle applicazioni musicali, volti ad allargare il campo della operatività dei nuovi strumenti e a svilupparne le capacità performative. Proprio al fine di testimoniare l'evoluzione si è ritenuto di dover estendere l'analisi fino alla contemporaneità, delineando, a grandi arcate, i confini tecnologici entro cui il nostro oggetto di ricerca si colloca.

Ricostruito l'ambito delle tecniche di progettazione del modello, con le sue interrelazioni con il mondo della creatività musicale, nel secondo capitolo, si è indagato i modelli fisici dal punto di vista della loro identità di strumenti virtuali, cercando di evidenziarne le peculiarità performative specifiche scaturite dalle differenti tecniche di modellizzazione. Ad una tipologia di produzione che si muove più prettamente nell'ambito della replica – ambito prediletto, ad esempio, dagli studi sull'acustica, oppure dalle applicazioni commerciali – si collega, in modo diretto, la produzione che costituisce il centro di tale ricerca, quella derivante dalla alterazione della replica virtuale, più propriamente correlata all'ambito artistico.

La diversa tipologia di modellizzazione degli strumenti virtuali è qui mutuata dalla classificazione proposta da Juraj Kojs, Stefania Serafin e Chris Chafe¹⁹, articolantesi in strumenti estesi, ibridi e astratti, secondo la declinazione di livelli differenti di ‘allontanamento’ dagli strumenti reali. A conoscenza della scrivente tale tipologia non è stata direttamente accolta dalla musicologia, sebbene possa indirettamente inquadrarsi nella prospettive sviluppate dalla *critical organology*, cui si è precedentemente alluso.

Tale strutturazione, per quanto rischi di non rispecchiare completamente l’odierna evoluzione delle applicazioni delle tecniche di modellizzazione, in continua e veloce ridefinizione (§ 2.3), risulta strategica per una delle finalità fondamentali della mia ricerca che consiste nel rispecchiare e testimoniare la concettualità soggiacente che lega la rappresentazione del modello alla sua concreta realizzazione in strumento, soprattutto in relazione al repertorio analizzato. Tale classificazione tornerà utile, infatti, nel terzo capitolo, poiché darà conto di quanto l’articolazione – strumento replica/esteso, ibrido o del tutto astratto – che scandisce il progressivo allontanamento dal reale, consenta di analizzare tanto i processi percettivi quanto quelli della metaforizzazione, necessari a comprendere il ruolo e la funzione degli strumenti virtuali nell’atto compositivo.

Il nesso concettuale risulta necessario poiché fornisce la congiunzione tra la rappresentazione (mentale) dell’oggetto/strumento soggiacente la costruzione del modello e il suo farsi ‘strumento’, con proprie peculiarità specifiche. Lo strumento andrà, così, ad interagire con le diverse prassi, comprese quelle consolidate del mondo reale, per esserne, a sua volta, ridefinito, all’interno di uno spazio operativo virtuale svincolato del tutto dai limiti della fisicità.

Assunte le tre categorie di strumenti virtuali, il mio apporto originale è consistito nel procedere ad una contestualizzazione d’uso del modello, ricostruendo, per ciascuna tipologia, l’immediata ricaduta nell’ambito ideativo-compositivo, al fine di testimoniare un aspetto fondamentale della mia ricerca che consiste nell’illuminare la relazione indissolubile che si costituisce tra la natura del modello, la tipologia di strumento con le pratiche performative correlate, e la contestualizzazione di quest’ultimo nella dimensione ideativa.

¹⁹ JURAJ KOJS – STEFANIA SERAFIN – CHRIS CHAFE, *Cyberinstruments via Physical Modeling Synthesis: Compositional Applications*, «Leonardo Music Journal», XVII (2007), pp. 61-66. a

Se, infatti, nel terzo capitolo, si mirerà in modo più specifico e con diverso sguardo, a delineare i processi compositivi e i linguaggi scaturiti dalla specificità degli strumenti virtuali, in questo capitolo l'intento consisterà, piuttosto, nell'indagare l'identità del modello in quanto strumento, non nel dominio diretto della programmazione, ma, piuttosto, in quello derivato delle pratiche musicali. È proprio la ricostruzione di tale quadro d'insieme elaborato nella relazione tra tipologie delle tecniche e processi compositivi a costituire un aspetto rilevante ed originale della mia ricerca e che è stato ottenuto al prezzo di un lungo lavoro di ricostruzione e di esegesi delle fonti.

Al fine di ricostruire un quadro complessivo delle ricadute performative dei diversi modelli, a questa prima panoramica sul repertorio costituitosi attorno alle singole tipologie di strumento virtuale – avente lo scopo non di una sommaria ricognizione ma piuttosto di ricostruire il contesto che ridefinisce l'identità stessa degli strumenti – seguirà, poi, l'analisi specifica di una scelta di strumenti virtuali – per verificare, in dettaglio, le loro specifiche potenzialità esecutive. Tale analisi si interrelaziona strategicamente con il fondamentale aspetto dell'elaborazione di interfacce, che permettono di gestire il sistema esecutore-strumento, per la stessa messa in atto del modello. La scelta degli strumenti analizzati rispecchia, da un lato, la loro rilevanza in relazione all'utilizzo in composizioni particolarmente rappresentative del panorama dell'uso dei modelli fisici, e, dall'altro, la già ricordata frammentarietà e dispersione delle fonti disponibili. In tal senso, si è cercato di dare soprattutto un quadro della molteplicità delle ricadute performative e delle configurazioni del sistema modello/interfaccia/opera, da intendersi, quest'ultima, in tutta la diversità e fluidità degli assetti possibili: dall'opera acustica, all'opera mista fino all'installazione multimediale, etc.

Il terzo capitolo, infine, cercherà di illuminare proprio la dialettica strumento/gesto virtuale-processo compositivo, mettendo in luce quanto la 'strumentalità' entri nella sfera dell'ideazione e dell'articolazione linguistica con prospettive ed esiti sempre diversi, in un contesto in cui prassi compositiva e ricerca tecnologica si sviluppino nella stretta interrelazione di linguaggio e modello. Attraverso l'analisi delle opere si osserverà come gli strumenti virtuali – nei differenti gradi di allontanamento dal reale, fino alla totale astrazione – aprano ad una molteplicità di formalizzazioni e di orizzonti ideativi.

All'interno del costituirsi di uno spazio compositivo 'altro', astrazione e realismo rappresentano gli estremi di un *continuum*, interpretabile secondo il concetto di 'plausibilità del suono', in cui finiscono per gravitare tutte le composizioni analizzate. Il concetto di plausibilità – introdotto in quest'ambito da Nicolas Castagné e Claude Cadoz nei primi anni del 2000,²⁰ permette di concettualizzare quel realismo o verosimiglianza uditiva necessari a indurre l'ascoltatore a ritenere che il suono, per quanto possa essere altro e desueto sia stato, comunque, prodotto per mezzo di una sorgente fisica.²¹

Sebbene ogni tecnica di sintesi possa idealmente produrre suoni plausibili, le tecniche di modellizzazione fisica producono suoni naturalmente plausibili, poiché, pur non essendo necessariamente progettati con riferimento a qualche oggetto reale, promanano dall'attivarsi di un procedimento fisico, e quindi di una gestualità immanente, che consente di pensare al controllo dello strumento simulato mediante gli stessi parametri usati per il controllo dello strumento reale. All'interno dello spazio del plausibile, le differenti gestualità insite nel modello – estese, ibride e astratte – sono state lette secondo i differenti livelli di surrogazione del gesto elaborati da Smalley. Tali livelli codificano, attraverso il concetto di *legame con la fonte (source bonding)*,²² i differenti gradi di distanziamento dalle sonorità note, in misura crescente di incertezza e distanza dalla realtà, fino a comprendere il livello di massima astrazione che si riallaccia, comunque, ad una dimensione primordiale della gestualità: e proprio in virtù di tale gestualità primordiale, non ancora espressamente musicale, che è possibile mantenere nello spazio del plausibile anche il gesto più astratto prodotto dalla modellizzazione.

Tale lettura è ulteriormente confortata dagli studi di psicologia della percezione musicale, ed in particolare, dal modello sviluppato da Marc Leman²³ che dimostra come i processi di azione/percezione possano disambiguare le relazioni stimolo-fonte incontrate nell'ambiente, a testimonianza di quanto l'esperienza musicale debba venir inserita in una dinamica di vincoli multipli che, influenzandosi vicendevolmente, costituiscono una complessa dialettica d'interazione culturalmente mediata. Tale

²⁰ Cfr. in part. NICOLAS CASTAGNÉ – CLAUDE CADOZ, *10 Criteria for Evaluating Physical Modelling Schemes for Music Creation*, Digital Audio Effects Conference DAF-X, London 2003, [7 pp.].

²¹ Il termine di plausibilità fisica introdotto, da Cadoz e Castagné, verrà discusso in part. nei capp. 1 e 3.

²² Si veda la nota 9.

²³ Si veda la nota 10.

modello si ritiene possa essere ulteriormente illuminato dalla strutturazione dei processi di ascolto secondo i concetti di imitazione e metafora, in virtù dei quali la cognizione musicale non può prescindere né dall'azione motoria mimetica (attiva o immaginata), né da processi metaforici. Secondo diversi gradi di interrelazione, la metafora può, infatti, giungere fino ad un livello di completa astrazione, in cui le gestualità modellizzate agiscono da sollecitazioni percettive che, partendo dalla natura materiale del suono, ricongiungono, pur all'interno del non-certo, il legame col mondo dell'esperienza. In tal modo, il compositore, agendo con gli strumenti virtuali, si colloca all'interno del *continuum* della plausibilità in cui l'agire metaforico si dispiega secondo una proporzionalità inversa, intensificandosi nella tensione verso l'astratto e riducendosi nel ritorno alla concretezza del reale. Ne risulta che lo 'spazio' compositivo che si costruisce all'interno di tale *continuum* è per sua natura uno spazio fluido, liquido in cui la dialettica tra realtà e virtualità si costituisce in una potenzialmente infinita catena di interrelazioni che, paradossalmente, si radicano tutte nel dominio della sensorialità.

All'interno di questo spazio costituito da potenzialità molteplici, si sono eletti tre inveramenti possibili, costituiti da tre casi di studio che rappresentano idealmente la diversità di soluzioni, di progettualità e di esiti linguistici che sottendono l'utilizzo dei modelli fisici. Ciò che li accomuna è la nozione di necessità che, in tutti i tre casi, rende 'strutturale' l'impiego di tale tecnica. Pertanto, lo sguardo gettato sulle opere di Michelangelo Lupone, Juraj Kojš e Mauro Lanza, vorrebbe mettere in luce tre possibili declinazioni differenti del virtuale all'interno dello spazio compositivo, nell'ipotesi di verificare l'avverarsi di una graduale 'virtualizzazione', sul lungo periodo, dell'intero processo creativo, che, partendo idealmente con la sintesi del suono (modello del segnale), arrivi alla sintesi degli strumenti e dei gesti (modello della sorgente), fino all'accesso alla dimensione ideativa. In tal senso, la sintesi per modelli fisici potrebbe costituirsi come uno degli snodi fondamentali, all'interno di un percorso più generale, che promuove una sorta di capovolgimento prospettico dell'agire compositivo.

Sempre i tre casi presi in esame, si ipotizza possano testimoniare come al processo di virtualizzazione corrisponda, inversamente, un processo di ri-attualizzazione, poiché le stesse formalizzazioni messe in atto ricadono nel dominio del mondo fisico a cui idealmente sono indirizzate. Ne consegue che, nell'incontrarsi delle articolazioni sonore del mondo virtuale con quelle del mondo reale si potrebbe dar vita ad una realtà ibrida,

letta, a sua volta, come metafora dell'ibridazione di uomo e macchina, da cui far emergere un 'estetica dell'inatteso' attraverso la relazione con la tecnica.

In *Corda di metallo*, di Michelangelo Lupone, si indagherà la possibilità del costituirsi di una circolarità di idea-tecnica-linguaggio, all'interno della quale la tecnica stessa possa disvelare qualcosa che è *in nuce* nell'idea iniziale del compositore, ridefinendosi, in tal caso, proprio nell'incontrarsi con il mondo della tecnologia. Il caso di Kojis, invece, potrebbe consentire di osservare come mediante la modellizzazione fisica, si possa 'retrocedere' ad una sorta di 'grado zero' prelinguistico, estrapolando un vocabolario di azioni capace di coniugare, *ab origine*, i due domini, quello fisico e quello virtuale. Poiché l'oggetto musicale non può definirsi, secondo le teorie psicologiche di matrice funzionalista, astraendo dalle condotte umane utilizzate per esprimere, rappresentare o costruire forme sonore, risulterebbe possibile leggere l'opera di Kojis come una sorta di metalinguaggio gestuale che esplori e sperimenti azioni performative proiettantesi tanto nel mondo fisico quanto in quello virtuale, da cui far scaturire un'espressività interamente basata sulle azioni.

L'ultimo caso di studio consentirà di verificare l'ipotesi di come, partendo dai linguaggi del virtuale, Lanza possa creare strumenti idiomatici che gli permettano di innescare procedimenti in grado di attraversare tutti i diversi materiali, tutti i diversi oggetti, in un'interrelazione che congiunge reale e virtuale in un artefatto unico da cui si può far scaturire un radicale allargamento del concetto stesso di strumento, il quale, al tempo stesso, diviene un oggetto del tutto fluido e de-territorializzato.

Per verificare tali ipotesi è necessario indagare come i modelli fisici si inseriscano all'interno della produzione esaminata, nei diversi luoghi possibili della prassi esecutiva e compositiva tra dimensione ideativa e della strumentalità, per mezzo del quale il virtuale entra nella creatività artistica.

In conclusione, l'oggetto stesso della presente ricerca potrà definirsi unicamente attraverso una visione d'insieme, poiché esso non può essere letto nell'astrazione della sua formalizzazione algoritmica, bensì nella concretizzazione del suo farsi strumento, con il necessario correlato di un meccanismo, che, facendosi gesto, entra a pieno titolo nei processi di creazione musicale. Ne consegue che solo un approccio transdisciplinare permetterà di cogliere la complessa trama di relazioni multidimensionali attraverso cui

quest'ultimo si costituisce propriamente in un oggetto di studio concepito nella relazione tensiva tra virtuale e reale. L'indagine, così, ha proceduto all'insegna del necessario equilibrio che consente di restituire una visione d'insieme in cui profondità e ampiezza dello sguardo potessero tentare di consegnare, nelle interazioni dei possibili percorsi di senso una piena ri-definizione conoscitiva dell'oggetto, cercando di rivelare il 'cosa', il 'come' e il 'perché': tre termini che, in estrema sintesi, dichiarano le motivazioni soggiacenti, che da un lato legittimano l'esistenza dei tre capitoli in cui si articola il presente lavoro, e dall'altro testimoniano che nessuno dei tre potrebbe esistere indipendentemente dagli altri due.

Capitolo I

La modellizzazione fisica per la sintesi del suono

1.1 Introduzione

Nel primo capitolo si indagherà il passaggio dal modello del segnale al modello della sorgente, fondamentale cambiamento di paradigma da cui scaturiscono le tecniche di modellizzazione fisica per la produzione del suono, a partire dagli anni Settanta. Tale paradigma si sviluppa in relazione agli studi di acustica musicale e soprattutto di psicoacustica che mettevano in luce le dinamiche della percezione sonora rilevando quanto quest'ultima si ricollegasse idealmente, anche all'interno di processi altamente formalizzati ed astratti, alla supposta origine materiale della produzione del suono. In tal senso, la modellizzazione fisica è una tecnica che consente di passare da un fenomeno percepito alla sua causa, alla sua profonda ragione soggiacente. Se, infatti, le tecniche di sintesi basate sul segnale imitano il suono, senza alcun riferimento alle modalità del suo emergere, le tecniche di modellizzazione fisica vanno ad indagare e restituire la meccanica di produzione sonora necessaria al processo di simulazione, costruendo quel 'legame con la fonte' capace di orientare efficacemente il processo percettivo: tramite la relazione tra la meccanica dello strumento da imitare e i parametri di controllo che derivano dalla modellizzazione, il modello si connota come 'generatore di suono', assumendo un'identità strumentale stabile.

Delineato tale contesto iniziale, si cercherà di ricostruire le peculiarità delle più significative tecniche di modellizzazione fisica del suono, con particolare riguardo ai quei metodi più efficacemente impiegati nella produzione musicale. A partire dal lavoro di Lejaren Hiller e Pierre Ruiz, che sono stati i primi a sperimentare tale tecnica in rapporto alla produzione sonora, si indagheranno i tre principali schemi di modellizzazione fisica: rispettivamente la tecnica modulare di interazione di massa, la tecnica modale e la tecnica per guida d'onda. Poiché altamente complesse si potrà osservare come tali tecniche si siano sviluppate, fino agli anni Novanta, in appositi centri di ricerca, dando vita a una sorta di geografia del loro utilizzo: la tecnica di interazione di massa è stata

sviluppata nel centro ACROE a Grenoble; la sintesi modale all'IRCAM di Parigi, mentre la tecnica per guida d'onda è stata sviluppata al CCRMA dell'Università di Stanford.

Se fino agli anni Novanta, dunque, i brani musicali sono stati composti, per lo più, in stretta sinergia con tali centri di ricerca, in seguito, grazie all'implementazioni delle tecniche in ambienti di più immediato utilizzo, quali ad esempio le librerie in Max/Msp, PD e il Synthesis Toolkit (STK) per le guide d'onda, si assiste ad un loro più generalizzato impiego compositivo, anche se, lo stesso STK, essendo legato ad una licenza d'uso del CCRMA e della Yamaha, è stato spesso utilizzato in maniera basica, senza poterne sviluppare adeguatamente le potenzialità performative. La panoramica si chiude con la disamina del linguaggio FAUST, esemplare testimonianza delle più recenti possibilità dell'uso dei modelli fisici. All'interno di un consimile linguaggio è, infatti, possibile implementare i modelli delle differenti tecniche di modellizzazione – guide d'onda e modali, fino alla prime sperimentazioni, negli ultimi anni, delle tecniche d'interazione di massa –, testimonianza ulteriore dell'esigenza di sviluppare un più facile accesso all'impiego musicale e, in generale, artistico, nell'ottica di un utilizzo 'fluidò' delle pratiche di sintesi al servizio della creatività.

1.2 Dal modello del segnale al modello della sorgente

«Un modello è un’astrazione selettiva della realtà»
(Albert Einstein)

Se nel mondo acustico il suono è prodotto dalla vibrazione delle parti meccaniche di uno strumento musicale tradizionale, che costituisce un dispositivo appositamente costruito per sfruttare i diversi meccanismi fisici per la produzione di vibrazioni, nello strumento musicale sintetico la vibrazione è descritta da funzioni nel tempo, dette segnali, che esprimono la variazione della pressione acustica nel tempo, grazie all’implementazione di una rappresentazione semplificata ed astratta delle modalità di produzione del suono: il modello.

Così, sebbene la sintesi del suono possa offrire grande libertà di costruzione del suono – sia imitando le sonorità del mondo reale, sia producendone del tutto altre –, tuttavia la sua finalità «non è tanto la riproduzione di un segnale voluto, quanto la realizzazione di un generatore suonabile, caratterizzato cioè da una articolazione timbrica paragonabile a quella degli strumenti classici».¹

Ne consegue che la generazione di un segnale acustico implica necessariamente, come già osservato, l’implementazione di un modello attorno al quale si sviluppa la realizzazione dello strumento musicale. Astratta, poiché il sistema reale, e la sua evoluzione, vengono ridotti ad un livello traducibile in una forma matematica semplificata che tende a selezionare gli aspetti ritenuti significativi del fenomeno in esame.

Tutte le definizioni operative – basate sul concetto di misura delle grandezze in gioco e delle relazioni matematiche alla base dell’elaborazione del modello – sono, dunque, il frutto di un’idea concettuale della realtà e del background culturale di coloro che la adottano, giacché non esiste una modalità univoca di costruire un modello che

¹ GIOVANNI DE POLI – CARLO DRIOLI – FEDERICO AVANZINI, *Sintesi dei segnali audio*, *Dispense dell’Università di Padova*, in <<https://www.dei.unipd.it/~musica/IM/cap5.pdf>> (accesso 21/02/2022), cap. 5, pp. 5.1-5.53: 5.2.

rappresenti formalmente la realtà di un dato fenomeno. Come afferma, infatti, Agostino Di Scipio:

Ogni strumento, in senso lato, è sede di conoscenze, speranze e sistemi di valori particolari, e reca l'impronta di coloro che lo hanno ideato e/o costruito, e contribuisce come tale a confermare e diffondere idee e valori caratteristici di quell'impronta, dunque relativi e storicamente definiti. In particolare, ogni tecnologia della musica rimanda ad un dominio di conoscenze pratiche e ad una "teoria della musica" – ad un campo di possibilità di azione musicale circoscritto da proprie regole.²

Le operazioni di analisi e sintesi – la cui applicazione consecutiva è la restituzione esatta del segnale strumentale originario – fin dalle prime formalizzazioni del suono strumentale, testimonieranno, dunque, tra i tanti possibili, un determinato modo di sintetizzare e di analizzare un segnale sonoro emerso in riferimento a particolari proprietà riscontrabili nello strumento produttore del suono o del nostro sistema uditivo, proprietà che rappresentano le ragioni storiche e semantiche dell'emergere di tale rappresentazione della realtà.

Ripercorrendo la storia della sintesi del suono per gli strumenti musicali acustici, a partire dalla metà del XX secolo, emerge l'uso di differenti modelli di formalizzazione del fenomeno acustico, segno dei differenti sguardi prospettici che rimandano a modi di concepire il suono in modo anche antitetico: dalle prime formalizzazioni astratte (additiva, *wavetables*, *FM synthesis*, etc.) – incentrate intrinsecamente sui processi percettivi di chi ascolta e sulle caratteristiche intrinseche del suono (sintesi del segnale) – alle sintesi per campionamento, che si avvalgono di vaste librerie di suoni preregistrati, fino ad arrivare all'uso dei modelli fisici, che emulano direttamente il comportamento degli strumenti, attraverso la modellizzazione degli stessi meccanismi fisici per la produzione di vibrazioni (sintesi della sorgente).

Sintesi del segnale e sintesi della sorgente, dunque, rappresentano paradigmi di riferimento molto differenti, all'interno dei quali si sono sviluppate, e, a tratti, intersecate, le diverse tecniche di sintesi del suono strumentale, in un percorso che – partendo dalle prime emulazioni del suono che si ascolta, legate ai fenomeni complessi

² AGOSTINO DI SCIPIO, *Tecnologia dell'esperienza musicale nel Novecento*, «Rivista Italiana di Musicologia», XXXV (2000), pp. 211-245: 239.

della percezione – testimonia di una visione sempre più pragmatica, sempre più radicata sull’oggetto che suona e sul suo controllo: non tanto controllo del risultato sonoro ma, piuttosto, della sua messa in funzione.

1.2.1 Il modello del segnale

La sintesi additiva e, a seguire, quella a modulazione di frequenza e di ampiezza – che costituiscono gli approcci classici all’analisi e alla sintesi dei suoni reali e degli strumenti musicali acustici – ben rappresentano l’inizio di tale percorso. Tali approcci si avvalgono di una rappresentazione del suono radicata nell’acustica classica: la visione di una meccanica ondulatoria del fenomeno sonoro che ha trovato, nella ‘teoria analitica del calore’ di Jean-Baptiste Fourier (1822), un’adeguata rappresentazione matematica, perfettamente funzionale ai successivi contributi di George Ohm (1843) e di Hermann von Helmholtz (1885), a loro volta decisivi per lo studio dei fenomeni della percezione uditiva e per la teoria del suono musicale.³ Il paradigma di riferimento è quello di un suono concepito come somma di oscillazioni sinusoidali periodiche o aperiodiche,⁴ e la restituzione esatta del suono strumentale originario si basa, in tal senso, su una coppia analisi-sintesi, la quale prevede l’operazione di scomposizione di un segnale (più) complesso nei termini dei segnali (più) semplici prescelti, e la corrispondente operazione di sintesi: astrattamente parlando, infatti, qualsiasi segnale può essere rappresentato come somma di segnali semplici, di tipo sinusoidale.

La sintesi additiva – che è un’applicazione dei principi dell’analisi armonica di Fourier – sfrutta, fin dal suo esordio in campo elettronico, questo meccanismo per imitare il suono di qualsiasi strumento musicale, sommando l’uscita di più oscillatori usati come generatori di forme d’onda, modulati e regolati secondo le caratteristiche risultanti dalla scomposizione di Fourier. La riproduzione della forma d’onda, che corrisponde al timbro dello specifico strumento, permette di emularne il suono.

³ Cfr. in part. CURTIS ROADS, *The Computer Music Tutorial*, MIT Press, Cambridge 1996, pp. 1073-1112.

⁴ Dal punto di vista strettamente formale, è importante notare come la preferenza per le sinusoidi rispetto ad altri componenti elementari, come per esempio le *wavelet* o gli ‘atomi’ o ‘grani’ sonori, sia assolutamente arbitraria.

Significativi esempi di tale paradigma si trovano sia nella progettazione di strumenti musicali elettronici inventati nel corso della prima metà del secolo, sia nei primi esempi di *elektronische Musik* realizzati alla WDR di Colonia, come fondamento metaforico per una metodologia compositiva basata sull'espansione della scala temporale e sulla reinterpretazione dello spettro come struttura formale. I compositori della prima stagione elettronica, all'inizio degli anni Cinquanta, realizzarono le prime composizioni basate sulla sintesi additiva con timbri ottenuti per sovrapposizione di suoni ad andamento sinusoidale tramite più registratori multitraccia, con rapporti numerici delle caratteristiche d'onda stabiliti secondo le precise teorie degli autori, formalizzando poi l'intera opera secondo uno schema matematico, anche delle sequenze sonore, come realizzato, ad esempio, da Stockhausen in *Studio II* (1954), concepito serialmente ad ogni livello sonoro e musicale:

Così il musicista [...] dovrà ampliare il proprio mestiere e studiare acustica per conoscere meglio il suo materiale. Ciò sarà indispensabile per tutti quei compositori che non si accontentano di accettare i fenomeni sonori come dati, ma che invece si oppongono alla dittatura del materiale e che vogliono, per quanto possibile, imporre le proprie concezioni formali ai suoni per arrivare ad una nuova corrispondenza tra materiale e forma: tra microstruttura e macrostruttura musicale.⁵

Comporre con i 'suoni composti' divenne l'assioma che unificò struttura formale e forma del materiale, costituendo l'elemento distintivo della prassi compositiva della musica elettronica a Colonia e a Darmstadt, che si identifica nell'unione tra pensiero scientifico e tecnica seriale, tra la fisica acustica di Helmholtz e la tecnica elettronica che permette di utilizzare il suono sinusoidale. Si costituisce, in tal senso, un anello di collegamento ideale tra lo strumento analitico – il teorema di Fourier, capace di definire matematicamente qualunque forma acustica – e il criterio costruttivo seriale, applicato non solamente alle strutture di 'alto livello', ma anche agli elementi vitali del suono.⁶

L'applicazione della tecnica seriale, attraverso l'onda sinusoidale elettronica, alla costruzione del timbro come elemento minimo alla base di una complessa architettura

⁵ KARLHEINZ STOCKHAUSEN, *Musica elettronica e musica strumentale*, in *La musica elettronica*, testi scelti e commentati da Henri Pousseur, prefazione di Luciano Berio, Feltrinelli, Milano 1976, pp. 45-50: 47.

⁶ GOTTFRIED-MICHAEL KOENIG, *Studium im studio*, «Musique en Jeu», VIII (1972), *Musiques Électro-Acoustique*, pp. 11-18.

musicale, rappresenterà il fondamento della saldatura concettuale e reale tra *micro* e *macro* forma: l'idea di poter comporre il suono, in quanto dimensione autonoma rispetto alla più tradizionale dimensione del comporre con i suoni, alla quale naturalmente si affianca e si interseca, dischiuderà un enorme potenziale linguistico-musicale e una grande varietà di concezioni estetiche.

Ma, se da un lato, nella prima stagione elettronica purista, la tecnica seriale sembrava essere il mezzo più appropriato per poter padroneggiare la materia sonora di fronte alle illimitate possibilità che essa offriva, dall'altro lato, da lì a pochi anni, emergeranno alcuni aspetti di grande criticità, quali l'immobilità interna del suono, e la mancanza di micro-articolazione della materia, caratteristiche queste ultime che non consentivano una stimolazione percettiva e un interesse nell'ascolto.⁷

Nello specifico, la costruzione di misture sonore – agglomerati di sinusoidi nei diversi rapporti sequenziali non direttamente riferibili al concetto di timbro – rispondeva, sì, da un lato, al desiderio di rompere l'incanto degli strumenti tradizionali attraverso i mezzi elettronici, ma, allo stesso, tempo testimoniava le intrinseche difficoltà nella realizzazione di una vera e propria sintesi additiva del timbro, la quale, dopo la prima esaltante euforia della stagione elettronica, evidentemente non reggeva in pieno il confronto con la complessità fenomenologica del suono. Operare con le attrezzature dell'epoca, infatti, era particolarmente costoso in termini di tempo e di qualità, il che portava a misture non interessanti, non solo per il numero ridotto di sinusoidi, ma, anche e soprattutto, per la mancanza di un'adeguata rappresentazione dell'evoluzione del suono. Lo stesso Stockhausen, a metà degli anni Cinquanta, ravvisa il problema delle misture e della 'neutralizzazione del suono', riconducendolo all'arbitrarietà e alla saturazione deterministico-seriale delle strutture, motivi per cui gli assiomi iniziali dell'elettronica pura seriale verranno ben presto rivisitati.⁸

Se la costruzione di suoni 'inauditi' attraverso la somma di sinusoidi non corrispondeva più alle aspettative percettive e di ascolto di una stagione compositiva

⁷ Cfr. *Ibidem*; PETER MANNING, *Electronic and Computer Music*, Oxford University Press, New York 2013; THOM HOLMES, *Electronic and Experimental Music*, Routledge, London, 2016; JENNIFER IVERSON, *Electronic Inspirations: Technologies of the Cold War Musical Avant-Garde*, Oxford University Press, New York, 2019.

⁸ Il tentativo di rendere più credibile e interessante percettivamente il suono conduce all'elaborazione di accorgimenti 'estranei', quali il passaggio delle misture nella camera di riverberazione allo scopo di introdurre disturbi non prevedibili e quindi aleatori. Cfr. FRANCESCO GALANTE – NICOLA SANI, *Musica espansa. Percorsi elettroacustici di fine millennio*, Ricordi-LIM, Milano-Lucca 2000 (*Le Sfere*), pp. 57-74.

improntata, comunque, all'arbitrarietà delle componenti del materiale sonoro, a maggior ragione, nell'ambito più specifico della ricostruzione del suono strumentale, tale rappresentazione mostrava costitutivamente diverse difficoltà, non solo per il numero ridotto di calcolo, ma anche per l'uso di un modello che non riusciva a descrivere il suono reale in tutta la sua interezza: il timbro non è, infatti, una somma di sinusoidi, ma rappresenta una complessa categoria percettiva che il modello di rappresentazione preso a prestito dall'acustica classica non permetteva del tutto di soddisfare, come paradossalmente testimoniato dal rapido evolversi delle premesse ideali e procedurali della stagione purista della WDR di Colonia.

Ricostruire il suono unicamente dalla forma d'onda e dalle sue parziali (armoniche o inarmoniche), secondo le rappresentazioni nel dominio della frequenza, lasciando implicita o derivata la determinazione del tempo,⁹ era del tutto insufficiente, giacché, nella creazione del timbro, rivestono un ruolo importante non solo le parziali presenti ma anche e soprattutto la loro evoluzione nel tempo, il tipo di attacco e le eventuali altre sonorità significative (rumore di attacco, soffio, etc).

Se dunque è vero, come afferma Stockhausen, che «la periodicità diventa un caso limite della aperiodicità», allora ricostruire i suoni strumentali della tradizione armonica, che del tutto armonici non sono, attraverso un modello improntato sulla periodicità diventa insufficiente e problematico, giacché il campo dei suoni reali è piuttosto il campo delle quasi periodicità, caratteristica fondamentale quest'ultima per la ricostruzione del suono strumentale.¹⁰

I mezzi elettronici che assumevano tale modello restituivano segnali perfettamente (matematicamente) periodici che non coglievano tutti gli aspetti musicali quali, ad esempio, il transitorio di un suono che è un fenomeno aperiodico, per quanto non impossibile da trattare anche con l'analisi e la sintesi di Fourier,¹¹ o anche la stessa

⁹ 'Guardare' ai suoni come composti di armonici coglie, per così dire, una caratteristica del mondo reale, e fornisce agli armonici (e alle sinusoidi) un significato nel mondo delle cose vere, diventando un paradigma della rappresentazione del suono quasi inconsapevolmente utilizzato non solo dai ricercatori, ma dai musicisti stessi, al punto tale che molti pensano agli armonici quasi come ad entità 'materiali', nascondendone la loro natura, in realtà esclusivamente formale. Cfr. in part. LORENZO SENO, *Sintesi per modelli fisici. Verso una semantica dei suoni*. Introduzione al workshop *Musica e Scienza 97*, CMR, Roma 1997, in <http://www.acustica.org/sem_suoni.html> (accesso 11-1-2020).

¹⁰ STOCKHAUSEN, *Musica elettronica e musica strumentale*, cit., p. 48.

¹¹ Cenni sull'analisi di Fourier possono leggersi in VINCENZO LOMBARDO - ANDREA VALLE, *Audio e multimedia*, Apogeo, Milano 2008, pp. 16-32.

fase stazionaria di un suono – il segmento rappresentato mediamente da tale modello di rappresentazione –, durante la quale le armoniche subiscono delle microfluttuazioni non solo in ampiezza, ma anche in frequenza, ‘sbandando’ lievemente in modo, anche qui, quasi periodico.

I suoni generati dagli strumenti acustici, anche melodici, nella realtà sono periodici solo approssimativamente: essi suonano come intonati, ma l’intonazione, o *pitch*,¹² è definita dal nostro sistema auditivo, un sistema complesso e dal funzionamento tutt’altro che chiarito in modo esaustivo. Tale nozione non è, infatti, di tipo fisico-matematico, bensì percettivo. In tal senso, l’illusione di ricostruire matematicamente il segnale con un dispositivo tecnologico pareva fallire paradossalmente proprio sul piano della percezione, essendo minata, nelle fondamenta, da una visione del suono intrinsecamente armonica: la non periodicità è non solo percepibile, ma ‘cercata’ dall’orecchio di chi ascolta. Il modello alla base di queste prime tecniche di sintesi, dunque, descriveva naturalmente alcuni tratti del suono, sebbene apparisse limitato dall’impossibilità di descrivere quelli che in tale visione non erano contemplati,¹³ tratti, però, essenziali sul piano percettivo e per il riconoscimento di un suono strumentale.

La necessità di una più puntuale rappresentazione del suono viene ben espressa da Jean-Claude Risset che, negli anni Sessanta, per esigenze prioritariamente musicali, intraprende la sua ricerca sul suono in ambito digitale:

In the fifties [...] the sounds of electronic music could be controlled more precisely, but they were simplistic and dull, so that one was tempted to enrich them by complex manipulations, thus destroying the effectiveness of control one could have over them. This conclusion prompted me in the sixties to explore the possibilities of computer sound synthesis. I felt that the precision and the reproducibility of the computer could help - while I always found

¹² Il concetto di *pitch* codifica, infatti, la sensazione uditiva che consente di ordinare un suono su una scala che si estenda dal basso verso l’alto (propriamente *gradazione di tonalità*). Il *pitch* dipende principalmente dal contenuto di frequenze dello stimolo sonoro, ma anche dalla pressione e dalla forma dello stimolo stesso. Cfr. ROADS, *Microsound*, The MIT Press, Cambridge 2001, in part. le pp. 195-238.

¹³ «Analysis-synthesis according to a given process implies estimating the parameters of a model of the sound. This model may or may not be adequate; it may or may not lend itself to a good imitation of the sound. For instance, Fourier series expansion is a useful tool for periodic tones, and Fourier synthesis, using the data of Fourier analysis, indeed permits one to synthesize a faithful copy of a periodic sound. However, as was explained earlier, most sounds of interest are not periodic; hence, Fourier series expansion is inadequate to replicate, for instance, a sound whose spectrum varies with time». JEAN-CLAUDE RISSET — DAVID L. WESSEL, *Exploration of Timbre by Analysis and Synthesis*, in *The Psychology of Music*, edited by Diana Deutsch, The Academic Press, New York 1999, pp. 113-169: 151.

something limited, contrived and whimsical about analog electronics. Synthesis permits to “compose” sounds in great detail. The sound material thus obtained is highly ductile, and I hoped it could be made complex enough to be musically interesting, while too simple sounds can turn off demanding listeners.¹⁴

La ricerca di Risset, iniziata insieme a Max Mathews e John Chowning, in quegli anni, presso il SAIL (*Stanford Artificial Intelligence Laboratory*) diede il via ad una modalità di ricerca completamente nuova, improntata sulla percezione uditiva «attraverso ambiti maggiormente stimolanti, quali le procedure di elaborazione del segnale, l’acustica e la sintesi del suono, facendo progredire i computer ancora più in là, sulla via di assisterci nella comprensione di ciò che è essenziale in musica il – suono!».¹⁵

Ma nemmeno il passaggio dall’analogico ai linguaggi di sintesi digitali per la creazione di spettri complessi, pur rappresentando una grande semplificazione nelle procedure, riusciva del tutto a rimediare alle limitazioni dell’ambito elettronico: anche in ambito digitale, infatti, la costruzione risultava assai lenta e, a causa dell’enorme mole di dati che richiedeva, era possibile solo per applicativi non in tempo reale. Ma soprattutto, il cosiddetto problema psicoacustico – la difficoltà di tenere conto dell’enorme complessità dei suoni musicali in un ambiente di programmazione per computer – già descritto da Mathews¹⁶ nelle ricerche sulla sintesi digitale degli anni Cinquanta, verrà presto esplicitamente riconsiderato e riformulato da Risset:¹⁷

However, the first attempts to use direct digital synthesis for music were disappointing. The synthetic sounds produced in the late fifties and the early sixties lacked variety, richness

¹⁴ JEAN-CLAUDE RISSET, *Fifty Years of Digital Sound for Music*, in *Proceedings SMC '07*, 4th Sound and Music Computing Conference, 11-13 July 2007, s. e., Lefkada 2007, p. 4.

¹⁵ JOHN M. CHOWNING, *Arte e scienza: Un’esperienza personale*, in *Arte e scienza del suono*, a cura di Cesare Beltrami, Franco Angeli, Milano 2003, pp. 15-16.

¹⁶ «The most general method to produce sound is direct digital synthesis, implemented by Max Mathews as early as 1957: the computer directly computes the numbers representing the waveform. Thanks to the flexibility of programming, it can thus produce virtually any waveform, without having to build an actual vibrating system». RISSET, *Computer Music: Why?*, Laboratoire de Mécanique et d’Acoustique, CNRS, Marseille s. a., p. [2]. <https://liberalarts.utexas.edu/france-ut/_files/pdf/resources/risset_2.pdf> (accesso 11-12-2020).

¹⁷ Cfr. RISSET, *The Development of Digital Techniques: A Turning Point for Electronic Music?*, in *Rapports IRCAM 9/78*, Paris 1978. In effetti, l’uso delle sirene per dimostrare le teorie sulla produzione del suono risale a prima di Helmholtz, dopo aver fatto parte della nota disputa di Ohm-Seebeck su come conciliare la natura fisica del suono con i suoi effetti percepiti. Per ulteriori informazioni su questa disputa, cfr. BENJAMIN STEEGE, *Helmholtz and the Modern Listener, Refunctioning the Ear*, Cambridge University Press, Cambridge 2012.

and identity. One could not get exciting new sounds by varying parameters haphazardly. Clearly, one lacked adequate physical descriptions of desired or interesting timbres. This is what we call the psychoacoustic problem: to use sound synthesis effectively, one must resort to some psychoacoustic knowledge or knowhow on the relation between the physical structure - which the composer controls when he specifies the synthesis data - and the aural effect - which determines the musical impact. "Classical" psychoacoustics is of little help here, since it bears mostly on the perception of simple sounds in isolation, while music deals with rich sounds in context. And the early synthesis attempts promptly revealed that auditory perception has intricate and apparently whimsical features.¹⁸

Più precisamente, gli studiosi si resero conto dell'inadeguatezza dell'utilizzo dei risultati delle analisi dei suoni degli strumenti musicali dei trattati di acustica musicale come dati di input per la sintesi del suono al computer. Le descrizioni classiche, infatti, modellavano i suoni strumentali in termini di uno spettro fisso caratteristico modulato da un inviluppo di ampiezza. Era evidente che la sintesi imitativa, anche per i suoni più familiari, necessitava di spunti di riferimento diversi (per l'orecchio): l'obiettivo non era quello di un *surrogato* dei suoni cercati, ma quello di avere un'idea di ciò che caratterizza l'identità dei suoni dei singoli strumenti. Attraverso nuovi protocolli di *analisi e sintesi*,¹⁹ Risset, lavorando sul programma di sintesi *Music V* di Mathews, ai Bells Labs, inizia a indagare sull'evoluzione degli spettri di frequenza nel tempo, fondando la ricerca su una più puntuale correlazione della composizione fisica e degli atti percettivi.²⁰

L'idea di concepire la struttura dei suoni sintetici tenendo conto delle specifiche 'idiosincrasie dell'udito' accompagnerà il lungo lavoro di ricerca di Risset e lo porterà nel 1969 al completamento del *Catalog of computer-synthesized sound*²¹ – accompagnato

¹⁸ RISSET, *Computer Music: Why?* cit., p. [2].

¹⁹ «The methodology we used can be called *analysis by synthesis*. The classical descriptions of instrumental sounds model them in terms of a characteristic fixed spectrum modulated by an amplitude envelope. The initial attempts to imitate brasses or strings with such a model failed completely, showing that the model is inadequate. In fact, using this model, electronic music had not succeeded in the fifties to properly imitate instrumental sounds». *Ivi*, p. [4].

²⁰ «Recently, computer sound synthesis has made it possible to synthesize virtually any sound from a physical description of that sound. Efforts have been made to use the results of analyses of musical instrument tones that are to be found in treatises on musical acoustics as input data for computer sound synthesis. In most cases, the sounds thus obtained bear little resemblance to the actual tones produced by the instrument chosen; the tones thus produced are dull, lacking identity and liveliness». RISSET – WESSEL, *Exploration of Timbre by Analysis and Synthesis* cit., p. 117.

²¹ RISSET, *An Introductory Catalog of Computer Synthesized Sounds*, Bell Laboratories, Murray Hill, New Jersey 1969, ristampato nel 1995 come parte di *The Historical CD of Digital Sound Synthesis*, Wergo, WER 2033-2, tracce 18-45. L'opuscolo contiene la spiegazione degli algoritmi utilizzati per la creazione dei suoni

dall'opuscolo *An Introductory Catalogue of Computer Synthesized Sounds* – una raccolta di esempi realizzati da lui stesso su richiesta di Mathews per un corso di computer music da lui tenuto nel 1969 con Chowning alla Stanford University. Nello specifico, analizzando gli spettri di frequenza nel tempo, non di un singolo spettro medio, ma di ogni singolo tono dello strumento, Risset sperimentò una sintesi che tenesse conto di come tali variazioni influissero profondamente sulla qualità del suono e sulla riconoscibilità del timbro, sia per quanto riguarda i transienti d'attacco, sia per le eventuali variazioni del contenuto spettrale legate a variazioni di intensità.

La correlazione tra intensità sonora e densità armonica all'interno del transitorio d'attacco dei suoni degli strumenti acustici, che egli scopre, grazie allo studio specifico del suono degli ottoni,²² gli permetterà di elaborare la sua *synthèse additive par règles*: una tecnica che permette di dedurre dall'involuppo della prima armonica l'ampiezza di ogni altra armonica, in modo compatto e leggero ai fini del calcolo, a dimostrazione del principio per cui l'identità di un timbro dipende molto di più dalle relazioni che legano tra loro i diversi parametri della sintesi piuttosto che dai valori fissi di questi stessi parametri. Il modello ereditato dalla musica elettronica non era, quindi, più sufficiente, poiché incentrato su un'idea del suono fissa, non dinamica che descriveva principalmente la percezione di suoni semplici ed isolati, mentre il suono calato all'interno di un contesto musicale richiama una percezione uditiva che ha caratteristiche «complesse e apparentemente stravaganti».²³

Così, se da un lato la sintesi in ambito digitale offriva la possibilità di comporre il suono in gran dettaglio ed in modo del tutto imparagonabile alle limitazioni delle apparecchiature elettroniche degli anni precedenti, dall'altro lato, proprio tale potenza di dettaglio, paradossalmente, consentiva l'emergere delle specifiche idiosincrasie dell'udito, verità della percezione²⁴ che ribadivano l'importanza di una più puntuale

corredata dal codice di *Music V*, offrendo in tal modo istruzioni e descrizioni ben dettagliate per la ricreazione e l'ampliamento degli esempi da lui realizzati.

²² «I found that brassy tones could be characterized by a rather simple property: the higher the amplitude, the richer the spectrum in high order harmonics. In particular, this ensures the asynchrony of the harmonics during the attack. This insight permitted me to synthesize brassy tones "by rule", the amplitude of each harmonic being deduced automatically from the envelope for the first harmonic». JEAN-CLAUDE RISSET, *Fifty Years of Digital Sound for Music* cit., p. 10.

²³ *Ivi*, p. 5.

²⁴ «Illusions, "errors of the senses", are "truths of perception", according to Purkinje». *Ivi*, p. 6. Cfr. in part. ALBERT S. BREGMAN, *Auditory Scene Analysis. The Perceptual Organization of Sound*, MIT Press, Cambridge 1990.

conoscenza della relazione tra la struttura fisica – che il compositore controlla quando specifica i dati di sintesi – e l’effetto uditivo che determina l’impatto musicale:

In my talk on the perception of musical sound, I explain that hearing has developed as an idiosyncratic process. The senses are not parameter-measuring devices: rather, perception has specific ways to interpret the sensory signals so as to get useful information about the outside world - the issue is survival. Hearing can thus make subtle inferences to interpret a sound signal in terms of its acoustic production: however, it is often at a loss with electrical sound signals which escape acoustic constraints. To identify a source, the ear relies on subtle and elaborate cues, such that the identification can resist the distortions occurring along the propagation of the sound signal.²⁵

Concependo la struttura dei suoni sintetici tenendo conto delle specifiche idiosincrasie dell’udito, si possono produrre illusioni uditive o suoni con proprietà paradossali, che rivelano la materia stessa del nostro udito, permettendo anche di creare effetti musicali, morfologici o teatrali. Risset, affascinato dalla prospettiva di poter confrontare i nostri meccanismi percettivi con un mondo sonoro virtuale, ossia simulato e regolato da leggi fisiche differenti, testimonierà, con la sua ricerca artistica, in simbiosi perfetta con quella scientifica, un’arte che scaturisce dal mettere in gioco, ingannandoli e disorientandoli, i meccanismi percettivi.

Emblematici di quegli anni, e primi esempi di una lunga serie, sono la *Computer Suite from Little Boy* del 1968²⁶ – il cui famoso il glissando senza fine vuole creare la sensazione della caduta infinita, del collasso psicologico vissuto dal pilota che si identifica, in sogno, con la bomba sganciata su Hiroshima – e *Mutations* del 1969 (il cui titolo è da intendersi come sinonimo di misture)²⁷, costituito dall’aggiunta graduale di armoniche sempre più alte che danno luogo a una rete di intervalli sempre più serrati

²⁵ RISSET, *Fifty Years of Digital Sound for Music* cit. p. 5. Lo stesso autore rimanda agli studi sulla percezione di BREGMAN, *Auditory Scene Analysis*, cit.

²⁶ Cfr. in part.: RISSET, *Paradoxes de hauteur*, in *7th International Congress of Acoustics*, Budapest 1972, pp. 20S10-20S14; ROBERT COGAN, *New images of musical sound*, Harvard University Press, Cambridge 1984, pp. 108-112; RISSET, *Pitch and rhythm paradoxes: comments on “Auditory paradox based on fractal waveform”*, «Journal of the Acoustical Society of America», DCCCXC (1986), pp. 961-962; CAROLINE TORRA-MATTENKLOTT, *Illusionisme musical: Jean-Claude Risset et l’esthétique de la musique électroacoustique*, «Dissonance», LXIV (2000), pp. 7-9.

²⁷ Cfr. in part. FABIEN LÉVY, *Mutations (1969) de Jean-Claude Risset: une écriture déjouée par des paradoxes*, in *Portrait Polychrome*, n°2, Jean-Claude Risset, INA/GRM éd., 2ème edition, Paris 2008, pp. 63-82.

per la creazione di suoni continui, che glissano verso l'acuto secondo una salita a spirale infinita che costituisce una paradossale illusione acustica.

Sempre *Mutations* permetterà a Risset di sperimentare la correlazione tra il parametro dell'intensità sonora e quello della ricchezza spettrale, una proprietà del suono non lineare, che costituirà anche la base per l'implementazione della modulazione di frequenza, potente tecnica di generazione spettrale elaborata da J. Chowning,²⁸ proprio a partire dal confronto diretto con Risset, durante il periodo di elaborazione della composizione ai Bell Laboratories.²⁹

Da lì a pochi anni, Chowning, attraverso il controllo attento dei parametri e della loro evoluzione nel tempo, fu in grado di produrre una grande varietà di timbri con spettri dinamici: dalla simulazione di molti strumenti musicali a quella della voce che canta.³⁰ La particolarità di poter ottenere spettri complessi con soli due oscillatori – manipolando soli tre parametri che determinano il centro dello spettro, l'estensione delle sue bande laterali e la densità di queste ultime (la frequenza dell'oscillatore portante, l'indice di modulazione e il rapporto frequenza portante/frequenza modulante) –, rappresenta un passaggio fondamentale della sua ricerca, come afferma, nel 1973, lo stesso Chowning:

The technique of FM synthesis provided a very simple temporal control over the bandwidth of spectra whose component frequencies can have a variety of relationships. Because "nature" is doing most of the 'work', the technique is far simpler than additive or subtractive synthesis techniques that can produce similar spectra. Perhaps the most surprising aspect of the FM technique is that the seemingly limited control imposed by "nature" over the evolution of the individual spectral components, proves to be no limitation at all as far as subjective impression is concerned. This suggests that the precise amplitude curve for each frequency component in a complex dynamic spectrum is not nearly as important, perceptually, as the general character of evolution of the components as a group.³¹

²⁸ Da una lettera personale di Risset, dell'aprile 2000, si apprende che Chowning iniziò a pensare alla Modulazione di Frequenza dopo la pubblicazione dell'articolo dello stesso Risset sulla sintesi degli ottoni (realizzata con la *synthèse additive par règles*). Cfr. in part. FABIEN LÉVY, *Complexité grammatologique et complexité apercpective en musique*, Tesi di dottorato, École des Hautes Études En Sciences Sociales, Paris 2004, p. 122.

²⁹ Cfr. RISSET, *Computer Music Experiments 1964-...*, «Computer Music Journal», V (1985), pp. 11-18; ID., *Composer le son: expérience avec l'ordinateur, 1964-1989*, «Contrechamps», XI (1990), pp. 107-126.

³⁰ Cfr. RISSET – WESSEL, *Exploration of Timbre by Analysis and Synthesis* cit, p. 131.

³¹ CHOWNING, *The Synthesis of Complex Audio Spectra by Means of Frequency Modulation*, «Computer Music Journal», I (1977), pp. 46-54: 54.

Chowning, in questo passo, focalizza la sua attenzione sull'aspetto percettivo, rappresentato, qui, dall'ampiezza dello spettro, un parametro saliente per l'orecchio che dipende dalla quantità di modulazione, il cosiddetto indice di modulazione, ma soprattutto ne evidenziava l'indipendenza a livello di risultato timbrico, la quale deriva da relazioni di altra natura. La complessità risultante non implica direttamente il lavoro di chi costruisce il suono, ma lascia spazio a procedimenti non lineari indipendenti dal controllo e a quegli aspetti del suono naturale non così facilmente prevedibili e calcolabili che li distingue dalla maggior parte dei suoni sintetizzati con le altre tecniche coeve.³²

Chowning intraprenderà un lungo lavoro di ricerca che lo porterà ad affinare tale tecnica – in particolare attraverso lo studio della fusione percettiva e della segregazione delle fonti –³³ non solo per la emulazione di suoni quasi-periodici in natura e negli strumenti tradizionali, ma soprattutto con lo scopo di «usare il computer per fare ciò che non possiamo fare con gli strumenti musicali naturali».³⁴ L'interesse di Chowning è rivolto a questa inedita caratteristica della FM proprio in funzione di tale aspetto: sottili attributi degli spettri naturali, che possono poi essere applicati allo sconosciuto, composto spazio timbrico con il risultato di un dominio ampiamente arricchito in cui il compositore può lavorare.³⁵ Come egli afferma, le applicazioni sono sicuramente più

³² «Analogamente, la modulazione di frequenza permette di “scrivere” il timbro muovendosi esclusivamente, come si è detto, nel dominio del *calcolo*, di cui il timbro è una sorta di funzione dipendente. Il tutto – giova ripeterlo – allo scopo di ottenere uno spettro appartenente ad una classe dalle caratteristiche morfologiche e timbriche peculiari e riconoscibili. In questo modo, operando nella stanza chiusa del calcolo, si dà vita a un universo timbrico esclusivamente digitale che non esaurisce l'infinità del possibile, ma ne esplora, rendendolo udibile, un suo sottoinsieme notevole di cui nessun modello acustico poteva suggerire l'esistenza». LUIGI PIZZALEO, *Alla ricerca di una chiave per l'infinito. Paradigmi originari della musica elettroacustica*, «Rivista DAT [divulgazione audiotestuale]», II (2018), pp. 87-106: 103.

³³ Cfr. CHOWNING, *Perceptual Fusion and Auditory Perspective*, in *Music, Cognition, and Computerized Sound*, MIT Press, Cambridge 1991, pp. 261-275.

³⁴ ALISON CHAIKEN – ANN ARBOR, *intervista a John Chowning*, 2006, Internet Audio Resource, <http://en.wikipedia.org/wiki/File:JohnChowning041306_part1.ogg> (accesso 11 dicembre 2020).

³⁵ «A full understanding of, and comprehensive application of the FM technique will certainly take a number of years. The applications are surely more numerous in the unknown timbral space than they are in the known. There is, however, great informative value in first limiting oneself to the simulation of natural timbres since we have such well-formed perceptual images against which one can measure success. What can be learned in this process are those subtle attributes of natural spectra that so distinctively separate them from most synthesized spectra, and which can then be applied to the unknown, “composed” timbral space with the result of a vastly enriched domain in which the composer can work». CHOWNING, *The Synthesis of Complex Audio Spectra by Means of Frequency Modulation* cit., p. 54.

numerose nello spazio timbrico sconosciuto che non in quello conosciuto: «There is a whole domain of musical timbre which exists in nature but is largely chaotic [...], there is an orderly world that exists using the computer of the inharmonic partials».³⁶

Sviluppata con la distorsione dello spettro acustico dei segnali resi via via sempre più inarmonici, la modulazione non lineare dei segnali è emblematica della continuità tra suono e rumore, riconducibile al nuovo paradigma della non-linearità,³⁷ che comprende in sé le categorie del periodico e dell'aperiodico, nettamente separate nell'acustica classica. L'insufficienza dell'universo newtoniano, mostrata dai contributi della teoria dei sistemi dinamici, si declina in musica nell'emancipazione dalle categorie di spazio-tempo mutate dalla fisica classica e nel delinearsi di una nuova acustica musicale che descrive i suoni come fenomeni evolutivi, eventi transitori e irreversibili tutt'altro che uniformi.

Nei sistemi non lineari – in cui la variazione di un solo parametro determina la transizione da uno stato stazionario ad uno periodico più complesso, fino a raggiungere il caos – si conferma pienamente l'irriducibilità del timbro alla somma statica dei parametri tradizionali e si stagliano in primo piano nuove procedure percorribili, riconducibili alla rivoluzione dei suoni complessi. Non solo nelle procedure dell'ambito strumentale – in cui la rinuncia all'unicità del sistema porta a una nuova globalità della forma costruita attraverso l'espansione delle singolarità presenti nella materia sonora derivante da procedure di biforcazioni e differenze – ma anche nell'ambito elettroacustico attraverso le diverse tecniche di analisi/sintesi elettronica, e la possibilità di riprodurre suoni complessi esteticamente apprezzabili.³⁸

Così, se da un lato, le ricerche di Max Mathews e Jean-Claude Risset avevano portato ad un cambiamento paradigmatico nell'acustica musicale, che rendeva ragione dell'estrema complessità ed instabilità morfologica del suono, – grazie all'osservazione nei suoni orchestrali della presenza di micro-variazioni di altezza e di modulazioni periodiche, come pure di differenti tempi di attacco delle parziali e del loro diverso inviluppo dinamico – con la modulazione non lineare dei segnali, avviata in ambito

³⁶ CHAIKEN – ARBOR, *intervista a John Chowning* cit.

³⁷ ANGELO ORCALLI, *Complessità e non-linearità nel pensiero musicale contemporaneo*, «Sonus: materiali per la musica contemporanea», VIII (1996), pp. 27-34.

³⁸ Cfr. *Foundations of Computer Music*, edited by Curtis Roads and John Strawn, MIT Press, Cambridge Mass. 1987.

musicale da Chowning, sembra portarsi a compimento il percorso avviato con l'avvento dei sintetizzatori controllati in tensione, determinante per il passaggio da un modo di comporre incentrato sull'organizzazione progressiva e lineare degli eventi, come nella musica concreta, a una prassi compositiva in cui tali eventi sono ottenuti tramite un processo che prevede anche la stessa generazione del suono.

1.2.2 Il modello della sorgente

Grazie agli studi di psicoacustica, Risset aveva focalizzato la sua ricerca in una direzione inedita, utilizzando i meccanismi della percezione, concepiti non come la somma di sensi che, in qualità di 'trasduttori', inviano al cervello una copia, sia pur elaborata, degli stimoli esterni, ma come un sistema che elabora gli stimoli del mondo fisico per ottenere informazioni utili sull'ambiente:

Il faut remplacer cette notion de transducteurs par celle de *systèmes perceptifs*, qui traitent les stimulations leur parvenant du monde physique pour y puiser des informations utiles sur l'environnement. Chaque sens aurait ainsi ses modalités particulières, adaptées à tirer parti des caractéristiques propres aux signaux physiques correspondants et à en extraire des indices sur le monde extérieur pouvant être utiles à la survie de l'organisme.⁴⁰

All'interno di tale idea, che si collega alla prospettiva funzionalistico-ecologica dello psicologo statunitense James J. Gibson (§ 3.3), i meccanismi della percezione non sono riconducibili a sistemi di misura fisici, i sensi non sono degli estrattori di parametri, ma costituiscono il risultato di millenni di selezione biologica utile all'uomo per sviluppare il suo equilibrio biologico con l'ambiente circostante: l'udito, infatti, è capace di elaborare processi altamente specifici per estrarre delle invarianti che, ad esempio, possono consentire di isolare un segnale sonoro in un contesto di altri stimoli uditivi, risalendo, così, alla sua causa meccanica.⁴¹

⁴⁰ RISSET, *Perception, environnement, musiques*, III (1988), *Les modalités de l'audition: pourquoi?*, in <<http://articles.ircam.fr/textes/Risset88a/index.html>> (accesso 14-11-2021).

⁴¹ Cfr. JAMES J. GIBSON, *The Ecological Approach to Visual Perception*, Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale (NY) 1986.

L'interesse di Risset si era concentrato, in modo particolare, sulla percezione, nel convincimento che una conoscenza non intuitiva «C'est aussi, c'est surtout, pour le musicien, faire de l'étude de la perception une aide à l'action, à la création, assurant que les relations musicales pensées puissent s'inscrire dans le sensible». ⁴² La musica dell'elaboratore elettronico è destinata, dunque, a costruire un mondo virtuale, che rilegge autonomamente i meccanismi della percezione, riappropriandosi liberamente dei vincoli percettivi in una rappresentazione 'interna' del mondo, che ritrasforma gli oggetti 'prodotti' dal soggetto durante la sua evoluzione biologica: con gli strumenti digitali si può quindi concepire una realtà immaginaria, in suoni reali che non hanno una controparte materiale.

Paradossalmente, tuttavia, in un contesto come quello della sintesi digitale in cui l'artificio domina poiché i suoni non vengono prodotti in un modo meccanico e le cause fisiche del suono sono completamente eliminate, l'orecchio cerca, comunque, di individuare delle tracce che possano farlo risalire ad una possibile causa fisica di ciò che è sottoposto alla sua percezione,⁴³ come affermava Risset:

L'audition est donc en quête des causalités mécaniques originaires des sons. A l'écoute d'un son produit par un haut-parleur, il ne suffit plus de désigner la source sonore - le haut - parleur - pour décrire le timbre. L'exploration de la synthèse numérique des sons permet de supprimer complètement la causalité mécanique, instrumentale, et de créer un monde sonore illusoire, sans contrepartie physique visuelle, tactile ou autre. Certains sons synthétiques peuvent être interprétés comme des percussions: mais, dans l'ordinateur, rien ne tape sur rien. Cependant, en présence de sons synthétiques, l'oreille continue de faire une enquête sur l'origine du son, et c'est lorsqu'elle peut assigner plausiblement à tel ou tel son une origine, un mécanisme physique, un objet qui l'a produit (son percuté, frotté, soufflé, liquide, métallique ...) que ce son est perçu comme ayant une présence notable et une identité robuste. L'audition est à l'affût de tous les accidents caractéristiques, tous les indices susceptibles de l'aider à remonter du son à sa source: lorsqu'on tente une synthèse sonore imitative, l'impression de réalisme est accrue si l'on y incorpore des accidents suggérant la source du son, par exemple le grincement de l'archet pour le violon.⁴⁴

⁴² RISSET, *Perception, environnement, musiques*, cit., *La perception comme point de départ*.

⁴³ CLAUDE CADOZ, *Concepts and Technologies for Multisensory and Interactive Simulation of Physical Objects – Application to Helios, a musical and visual artwork for the Helicanthe Platform of the ACROE*, in *Proceedings of the 15th Sound and Music Computing Conference*, Limassol, Cyprus 2018, pp. 18-41.

⁴⁴ RISSET, *Le son numérique : une acoustique affranchie de la mécanique ?* «Journal de Physique», IV (1992), 02 (C1), pp. C1-3-C1-11: C1-9.

La relazione tra il modo in cui la nostra percezione riceve le proprietà del suono e le causalità di queste ultime sarà, in quegli anni, il fondamento di un nuovo approccio della ricerca, il quale, partendo dalla consapevolezza di quanto, anche al suo massimo grado di astrazione e di formalizzazione, il pensiero non si esteriorizzi senza un supporto materiale, giungerà all'idea di una sintesi del suono basata sulla fisica.

Le tecniche di sintesi fino ad allora conosciute tentavano, infatti, di imitare il suono dello strumento, senza alcun riferimento ai processi di funzionamento di quest'ultimo. Il confronto tra la meccanica dello strumento da imitare e i parametri di controllo che la tecnica di sintesi utilizzava per l'imitazione del suono di quel determinato strumento non mostrava, infatti, alcun punto di contatto. La modificazione di quei parametri comportava dei cambiamenti uditivi legati in modo complesso alle alterazioni effettuate: il risultato appariva, dunque, difficile da controllare.

Per tali ragioni, si fa strada l'idea che lo strumento della creazione del suono debba essere esso stesso creato al fine di emulare, non tanto l'onda sonora risultante, quanto i processi fisici in atto nello strumento nel momento in cui emette il suono.⁴⁵ L'imitazione non riguardava più il suono (l'effetto) ma, direttamente, il comportamento dell'oggetto che produceva il suono: la sorgente, di cui è possibile modellizzare matematicamente il 'moto' delle componenti vibranti.⁴⁶

Nel 1971, Lejaren Hiller, James Beauchamp e Pierre Ruiz della University of Illinois furono i primi ad adattare i modelli fisici alla sintesi degli strumenti.⁴⁷ Il loro lavoro si concentrò sulla sintesi del suono di oggetti vibranti come corde, barre, piatti e membrane messe in movimento dal pizzicato e dalla percussione.

Dallo studio analitico del comportamento acustico essi arrivarono ad approssimare il suono dello strumento con la risoluzione delle equazioni differenziali, capaci di suggerire una previsione dell'andamento di un sistema messo in moto da fattori esterni.⁴⁸ Nello specifico, l'operazione, molto complessa, implicava inizialmente

⁴⁵ RISSET – WESSEL, *Exploration of Timbre by Analysis and Synthesis* cit., p. 131.

⁴⁶ Per il violino e la sua famiglia, ad esempio, sappiamo grosso modo come interagisce l'archetto con la corda, quali siano le forme d'onda, e come esse vengano modificate dalla cassa.

⁴⁷ Un altro pioniere della sintesi della modellizzazione fisica è Ercolino Ferretti, che ha diretto il lavoro degli studenti del MIT, dell'Università di Harvard e dell'Università dello Utah negli anni Sessanta e Settanta. Cfr. ROADS, *The Computer Music Tutorial* cit., p. 267.

⁴⁸ «The first physics-based simulation of a vibrating string was introduced by Hiller and Ruiz in 1971, where they applied the finite-difference time-domain (FDTD) method. This method originates from

la specificazione delle dimensioni fisiche e delle caratteristiche degli oggetti vibranti, comprese poi le 'condizioni al contorno', cioè le modalità con cui tali corpi sono vincolati tra di loro e ai loro supporti (supposti fissi)⁴⁹ e, una volta definite le condizioni iniziali del sistema, l'applicazione di una eccitazione (descritta matematicamente), al fine di studiare il suo effetto sul sistema tramite equazioni differenziali, e di ottenere l'equazione d'onda che descrive il suono risultante. In realtà, poiché il tempo rappresentato su un computer digitale non è continuo, ma quantizzato, occorre procedere ad una ulteriore complessa operazione di approssimazione delle equazioni differenziali del moto in equazioni di differenza finita,⁵⁰ che fornisca il suono dello strumento: i metodi per la simulazione nel dominio temporale discreto di tali sistemi acustici spazialmente distribuiti sono, appunto, denominati modelli fisici.⁵¹

Pertanto, la tecnica di base utilizzata da Hiller e Ruiz presentava un'elevata complessità computazionale, soprattutto con le apparecchiature dell'epoca, cosicché rimase più che altro uno studio scientifico, senza alcuna ricaduta in ambito artistico, sino agli anni successivi, in cui tale approccio venne notevolmente sviluppato con metodologie diverse, tra cui, una delle più efficienti, sarà costituita dall'algoritmo Karplus-Strong del 1983 (§ 1.3.4). Ma prima di tale metodologia va ricordata una delle soluzioni più direttamente collegate all'algoritmo Hiller e Ruiz che fu il paradigma di interazione di massa Cordis elaborato nel 1979 (§ 1.3.2), un compilatore modulare simile

computational electrodynamics. [...] In physics-based sound synthesis it is more often referred to as the finite-difference method (FDM). In reality the FDM does not refer to a single method but rather to a family of numerous FDTD schemes. They all function in the space-time grid using "neighboring points", however the approach to defining the operators each time differs. An extensive analysis of FDTD schemes for the wave equation can be found in [STEFAN BILBAO, *Parameterized Families of Finite Difference Schemes for the Wave Equation*, «Numerical Methods Partial Differential Equations» XX (2004), pp. 463-480]. CHARALAMPOS SAITIS, *Physical Modeling of the Piano: An Investigation into the Effect of String*, Master thesis, Sonic Arts Research Centre School of Music and Sonic Arts Belfast 2008, pp. 16-17.

⁴⁹ Negli strumenti acustici reali, infatti, il suono emesso risulta dall'interazione di un gran numero di fattori variabili nel tempo. La complessità di molti strumenti acustici deriva dal fatto che i parametri fisici sono in mutua interazione in strutture articolate. Per comprendere il meccanismo complessivo di produzione del suono conviene considerare lo strumento come composto da sottosistemi elementari, ognuno con una specifica funzione. Il sistema risulterà approssimato dall'accoppiamento dei diversi sottosistemi e dal loro adattamento di impedenza (§ 1.3.1).

⁵⁰ Le approssimazioni numeriche, tuttavia, hanno prodotto alcuni effetti spuri. Inoltre, la notevole quantità di calcoli richiesti sembrava, all'epoca, proibitiva.

⁵¹ Le operazioni per giungere alla definizione del modello erano diverse: si specificano le dimensioni fisiche e le caratteristiche degli oggetti vibranti (lunghezza, larghezza, spessore, massa, elasticità, etc.); si specificano poi le condizioni al 'contorno', cioè in che modo tali corpi sono vincolati tra di loro e ai loro supporti (supposti fissi); si specificano le condizioni iniziali, ad es. la posizione di partenza di una corda; si applica una eccitazione, descritta matematicamente, e si studia il suo effetto sul sistema tramite equazioni differenziali, ottenendo l'equazione d'onda che descrive il suono risultante.

a programmi di sintesi come il *Music V* di Mathews, che interpretava i moduli non come elementi di sintesi o di elaborazione del segnale – con operazioni di rappresentazione, analisi, trasformazione e ricreazione del suono –, ma in funzione delle cause fisiche del suono.⁵²

Dato che negli strumenti acustici reali il suono emesso risulta da una complessa, mutua interazione di parametri fisici, articolati all'interno di strutture variabili nel tempo, lo studio del meccanismo complessivo di produzione del suono partiva dal considerare lo strumento come composto da sottosistemi elementari: dei blocchi ognuno con una sua specifica funzione. Il sistema complessivo risulterà, quindi, approssimato dall'accoppiamento dei diversi sottosistemi e dal loro adattamento di impedenza.⁵³

È fondamentale, infatti, nella modellizzazione fisica, l'interazione tra un eccitatore e un risonatore: il primo è un blocco costituito da un'azione che provoca una vibrazione – come, ad esempio, il plettro nella chitarra, l'archetto nel violino, il martelletto nel pianoforte, l'ancia nel clarinetto –, il secondo è la risposta del corpo di uno strumento alla vibrazione di eccitazione (sono blocchi risonatori, ad esempio, la corda nella chitarra, nel pianoforte e nel violino, o il tubo acustico nei legni e negli ottoni).⁵⁴ In generale, ciascuno dei due blocchi viene descritto da un sistema dinamico, tipicamente lineare, per quanto riguarda il risonatore, e non lineare per l'eccitatore.

La presenza di relazioni non lineari gioca un ruolo essenziale nello sviluppo di modelli di sistemi acustici; in assenza di esse, questi si ridurrebbero a schemi di sintesi sottrattiva, in cui un segnale di eccitazione viene sottoposto a filtraggio. [...] Le non linearità sono presenti in particolare negli eccitatori e nei meccanismi di interazione di questi con i risonatori. [...] Ad un primo livello di approssimazione si può supporre che il meccanismo di eccitazione sia rappresentato da una funzione non lineare istantanea la cui forma viene a volte dedotta da osservazioni sperimentali e direttamente implementata nella simulazione.⁵⁵

⁵² Tale aspetto, apparentemente banale, è proprio quello che pone le basi del paradigma della simulazione multisensoriale e interattiva degli oggetti fisici, sviluppato dall'ACROE (§ 1.3.2).

⁵³ Cfr. ROADS *The Computer Music Tutorial* cit., pp. 269-270.

⁵⁴ Per uno sguardo d'insieme, cfr. *ivi*, pp. 269-298.

⁵⁵ ANDREA FREGNAN, *Controllo gestuale di modelli fisici per la sintesi sonora di membrane percosse*, Tesi di laurea in Ingegneria informatica, Università di Padova, a. a. 2011-12. Un esempio è fornito da un modello di corda strofinata in cui, per diversi valori della pressione e della velocità dell'archetto (i parametri di controllo), la velocità trasversale della corda e la forza di frizione tra corda ed archetto sono legati da una

Le successive interazioni eccitatore/risonatore esprimono il modo in cui avviene il trasferimento di energia, dall'eccitatore al risonatore, che può essere disaccoppiato (o *feedforward*) e accoppiato (o *feedback*).⁵⁶ L'interazione tra l'eccitazione e la risonanza è centrale nell'approccio per modelli fisici: attraverso questa descrizione si rende conto non solo delle proprietà del segnale acustico ascoltato dall'ascoltatore, ma, più precisamente, delle proprietà della sorgente che creano la varietà e la sottigliezza del suono percepito nelle esecuzioni strumentali:

If we refer to the real situation, playing a musical instrument for example, but more generally each time that a physical action is applied to a material thing, there are always two combined categories of physical causes: the gesture and the material object on which it applies. [...] But the gestures we apply to a physical object depend on its physical properties and, inseparably, our own physical properties – which are complex and, moreover, variable in the course of our action. This leads us to consider the interaction itself inseparably from what is interacting. The dualism of physical interactions results in the fact that two related variables are needed to describe them, and that's what introduces a break with the paradigm of the input-output functional blocks of Music V (and its derivatives).⁵⁷

Laddove l'approccio spettrale rappresenta una combinazione di frequenze e ampiezze risultante da un'interazione arco-corda, l'approccio della modellizzazione fisica simula la meccanica concreta di quella interazione: una volta creato un modello di oggetto (per esempio una corda, un tubo, o un piatto metallico), si avrà la possibilità di ricreare fedelmente non solo l'insieme dei suoni producibili dallo strumento reale, ma anche, implicitamente, l'insieme dei gesti esecutivi connessi all'emissione di quei suoni (ad esempio, premere con maggiore o minore forza e velocità l'archetto, scegliere il punto dove posarlo, più al tasto o più al ponte, etc.).

Così, se da un lato, con i modelli del segnale era possibile, almeno virtualmente, costruire qualsiasi suono a patto di saper gestire opportunamente i relativi parametri

relazione altamente non lineare. Un'analogia relazione si trova tra pressione e flusso in un modello semplificato di ancia di clarinetto.

⁵⁶ Cfr. ROADS *The Computer Music Tutorial* cit., p. 268.

⁵⁷ CADOZ, *Concepts and Technologies for Multisensory and Interactive Simulation of Physical Objects* cit, pp. 21-22.

(ampiezze, frequenze di modulanti e di modulate, frequenze sommate, caratteristiche dei filtri, inviluppo e forme d'onda elementari, etc.), attraverso la tecnica di 'costruire segnali a partire dai segnali' all'interno di uno spazio infinitamente dimensionale di tutti i suoni possibili; dall'altro lato, con i modelli della sorgente si riacquistavano i vincoli fisici dello strumento acustico, poiché, una volta costruito il modello dello strumento (anche inedito), è la fisicità stessa dell'oggetto a delimitare il possibile campo sonoro.

Question: The resonant modes of a wind instrument are not perfect harmonics, but the tone may be perfectly harmonic. On the other hand, a percussion instrument has non-harmonic resonances and produces a non-harmonic sound. What is the difference?

Answer: The key here is to consider not just to consider the resonant modes and how they are placed, but how the instrument is excited. If you pick up a trumpet and hit it with a hammer, the sound is percussive. If you take a snare drum and excite it with a [vibrator] the sound is harmonic.⁵⁸

Come viene illustrato nell'intervista citata, Bernard Hutchins mette il fuoco sul fatto che è proprio il radicamento nei meccanismi di produzione del suono a richiamare, implicitamente, come suoni risultanti dalle equazioni, timbri con un'identità più forte, caratterizzati da un'evoluzione timbrica naturale, analoga a quella degli strumenti acustici, che l'ascoltatore può plausibilmente attribuire a uno specifico processo di generazione acustica: il gesto.

In particolare – analogamente a ciò che avviene nella concretezza della performance dal vivo di un 'vero musicista' che suona un 'vero strumento' – il modello fisico permette di conservare quelle caratteristiche di varietà e coerenza richieste dall'orecchio umano. Infatti, nel descrivere il moto di un oggetto reale, pur se necessariamente semplificato, la modellizzazione fa in modo che tale oggetto evolva sotto l'azione delle forze esterne, lasciando che esso da solo, produca i suoi armonici (o inarmonici) e tutti gli accidenti che si verificano in termini di prestazioni, come scricchiolii, modalità di chiusura, e multifonici.⁵⁹ Anche se nulla colpisce, raschia o soffia

⁵⁸ BERNARD A. HUTCHINS, *Special Issue D: A Review of Fourier Methods in Signal Processing and Musical Engineering*, «Electronotes», XV (1984), pp. 155-160, cit. in ROADS, *The Computer Music Tutorial* cit., p. 312.

⁵⁹ THOMAS HELIE, *Modélisation physique d'instruments de musique en systèmes dynamiques et inversion*, Ph. D. Thesis, Università di Parigi XI, Paris 2002.

all'interno di un programma per computer, tali effetti, se utilizzati in modo controllato, possono aggiungere una dose di realismo nella simulazione, essendo presenti naturalmente, come un effetto collaterale di alcuni parametri, all'opposto di quanto avviene nella sintesi additiva, in cui tali specifici effetti devono essere inseriti per ogni dettaglio del suono.⁶⁰

Potendo conferire allo strumento la contingenza tipica di una performance reale, attraverso parametri che sono strettamente correlati alle proprietà fisiche della sorgente sonora, la sintesi per modelli fisici sembrava offrire, almeno nell'ambito della imitazione e nella produzione di sonorità strumentali, una certa corrispondenza alle aspettative dell'orecchio. Tuttavia, essendo lo scopo della sintesi non tanto la riproduzione di un segnale voluto, quanto la realizzazione di un generatore suonabile, caratterizzato cioè da una articolazione timbrica paragonabile a quella degli strumenti classici, l'attenzione fu focalizzata sulle possibilità di controllo dell'algoritmo e dell'articolazione timbrica offerte dagli strumenti sintetici. In tal senso, la sintesi per modelli fisici segue un approccio mirato alla rappresentazione della dinamica degli oggetti responsabili della produzione del suono, che mette al centro l'implementazione dell'interazione tra lo strumento e lo strumentista in virtù della relazione diretta della maggior parte dei parametri del modello con le caratteristiche dello strumento reale.

Se tra esecutore e strumento tradizionale si crea un'interfaccia la quale, mediante il controllo dell'espressività dello strumento e della dinamica spettrale, determina e vincola le possibili azioni, costituendo uno spazio di collegamento che favorisce la traduzione in suono, da parte dell'esecutore, della descrizione simbolica dei suoni, contenuta in partitura; allo stesso modo, tra l'algoritmo di sintesi – la descrizione dello strumento – e il musicista è pure presente un'interfaccia di controllo:⁶¹ quest'ultima costituisce ciò che il musicista conosce dello strumento e l'oggetto con cui interagisce. L'interfaccia di controllo mappa, così, l'insieme delle possibili azioni dell'esecutore nei parametri di controllo degli algoritmi sottostanti in maniera tale da presentare una coerenza e una consequenzialità che soddisfi le aspettative dell'esecutore.

Così, la possibilità di avere dei parametri tempo-variabili in diretta relazione con

⁶⁰ Cfr. RISSET, *Perception, environnement, musiques*, cit., *La perception comme point de départ*.

⁶¹ Se negli strumenti commerciali l'interfaccia è predeterminata dal costruttore, l'uso del computer, invece, ha consentito di costruire interfacce molto più flessibili e programmabili in base alle necessità dell'utente, per cui esse possono comprendere diversi livelli di astrazione.

quelli dell'oggetto fisico responsabile della generazione del suono costituisce, dunque, l'aspetto cruciale di queste tecniche, le quali, pur ancorandosi ai vincoli fisici dell'oggetto, permettono di superare virtualmente molti ostacoli pratici e perfino certe leggi fisiche dello strumento reale, aprendo a sperimentazioni artistiche inedite ed inusitate, mediante valori irrealistici dei parametri fisici, che possono essere variati secondo modalità non fattibili con dispositivi acustici reali, arrivando, persino, a programmare leggi fisiche arbitrarie, strumenti inediti e fantasiosi, seppur plausibili, ed inedite gestualità (§ 3.3).

Le tecniche di modellizzazione fisica sono, dunque, scalari, consentendo, ad esempio, di costruire, dalla descrizione di una specifica singola corda, una chitarra virtuale, le cui corde possono essere lunghe e dense come i cavi di sospensione di un ponte, oppure di modificare dinamicamente le dimensioni di alcune parti di uno strumento virtuale (ad esempio allungando un tubo di risonanza).

Si potrebbero scegliere, inoltre, il tipo di corda (gomma, budello, acciaio, acciaio ideale con tutte le gradazioni intermedie), il tipo di mezzo acustico (elio, aria, acqua, olio, etc.), la 'ruvidità' dell'archetto; oppure aprire a gestualità inedite ed a inediti incroci tra coppie diverse di eccitatori/risonatori come suonare la corda del pianoforte con un archetto, o, ancora, cambiare il materiale con cui tale corda è costituita, suonando, ad esempio, un glissando da budello ad acciaio perfetto, passando per tutte le possibili gradazioni intermedie all'interno della medesima nota.

Dopo una prima ricostruzione – un'operazione che incarna l'ideale newtoniano di un preciso modello matematico di un processo meccanico-acustico complesso – lo strumento virtuale può esorbitare, dunque, dai limiti dello strumento fisico, pur consentendo, allo stesso tempo, di mantenersi nell'ambito di modalità intuibili in una rappresentazione mentale fisica dell'oggetto concreto, anziché astrattamente prodotta dal segnale stesso.⁶² Un approccio fisico, dunque, piuttosto che imitativo: anziché, infatti, guardare al suono per quello che quest'ultimo introduce nel segnale, si guarda al suono nei suoi meccanismi di produzione, ottenendo un segnale che, per molti aspetti, riporta alla fisicità del mondo materiale, alla fisicità degli oggetti che emettono il suono e dei mezzi nel quale si propaga. Ma non solo: «by assembling basic but appropriate

⁶² MAURO GRAZIANI, *Tecniche di sintesi*, in http://www.maurograziani.org/text_pages/tecniche_sintesi/intro/MG_Sintesi2.html (accesso 3-1-2021).

physically-based building blocks, one may obtain a model able to synthesize sounds that have absolutely no real counterpart – so that a physically-based model can be considered as a “musical reality generator”». ⁶³

Così, in tale operazione di emulazione di strumenti – corde pizzicate, ottoni, percussioni – o anche della voce umana, il richiamo alla fisicità, non è dato, almeno in ambito artistico, tanto dalla *copia* dei processi reali in tutti i suoi dettagli, quanto dalla simulazione delle caratteristiche più rilevanti per l’orecchio di quei processi medesimi, che costruiscono una certa causalità tipica della realtà:

The important feature for a musical sound is not to correspond with the sound of a real cause, but to present a set of subtle dynamic variations among perceptual parameters that lead the listener to feel that some physical process was involved in its generation. A sound may be far from evocating any real acoustic source while still being “plausible”. Since they are based on the modelling of some physical process, physical models tend naturally to generate plausible sounds, even when they are not designed with reference to any real object. ⁶⁴

Il ‘pensare fisico’ si esercita, dunque, attraverso tali ‘generatori di realtà virtuale’ (§ 3.2), ⁶⁵ che si muovono all’interno di un nuovo spazio della creatività, che, pur comprendendo ‘oggetti’ del tutto non reali, testimonia, comunque, una certa ‘plausibilità’ fisica, per cui, per esempio, la modifica di un parametro fisico all’interno di un modello fisico tende a produrre un effetto coerente sulla percezione, la cui salvaguardia è garantita dai vincoli meccanici che l’oggetto modellizzato stesso offre: con un modello fisico, infatti, difficilmente si modificheranno in modo indipendente i parametri percettivi (intensità, timbro...), cosa possibile, invece, con i modelli basati sul segnale.

Il punto chiave della modellizzazione in ambito creativo appare, così, la ricerca di algoritmi che possano garantire la plausibilità fisica del modello, conferendo una certa *robustezza* percettiva che non limiti la creatività: la ricerca dell’imitazione, in senso

⁶³ NICOLAS CASTAGNÉ – CADOZ, *A Goals-Based Review of Physical Modelling*, in *Proceedings of the International Computer Music Association*, Barcelona 2005, pp. 343-346: 343.

⁶⁴ *Ivi*, p. 344.

⁶⁵ GIANPAOLO BORIN – GIOVANNI DE POLI – AUGUSTO SARTI, *Algorithms and Structures for Synthesis Using Physical Models*, «Computer Music Journal» XVI (1992), pp. 30-42.

stretto, non corrisponde, difatti, a un reale ampliamento dei nostri strumenti di creazione, poiché il processo della metaforizzazione degli strumenti o oggetti reali diventa, piuttosto, un nuovo spazio creativo di equilibrio tra realtà e virtualità.

In tale spazio di creatività, il pensare fisico offre l'opportunità di una rappresentazione semantica: l'algoritmo di sintesi contiene, infatti, gli attributi fisici dello strumento – per esempio la lunghezza, la tensione e la rigidità di una corda –, parametri assai più intuitivi per il musicista rispetto a quelli dell'elaborazione del segnale, quali l'involuppo delle componenti spettrali o l'indice di modulazione. I modelli fisici tendono, in tal senso, a spostare l'origine della vitalità del suono dal flusso di controllo al modello stesso: non avendo bisogno di una 'mappatura' artificiale degli ingressi sui parametri dei modelli, consentono una rappresentazione intuitiva dell'azione che normalmente si esegue con gli strumenti. Poiché vengono impiegati algoritmi caratterizzati da un limitato numero di parametri di controllo, i quali hanno quasi sempre un significato fisico: poche ed intuitive variazioni sui parametri stessi producono dei risultati sonori coerenti con l'esperienza, anche gestuale, del musicista. La possibilità di un controllo sintetico e diretto recupera un fattore essenziale nella pratica musicale: la modalità esecutivo-interpretativa e la gestualità proprie dell'esecutore (§ 3.3).⁶⁶

Il riconoscimento del gesto, anche se riferibile a un oggetto non riconoscibile, in quanto gesto, costituisce un riferimento importante per la percezione da parte del soggetto.⁶⁷ Tale riferimento non si è ancora necessariamente alle proprietà reali – dato che potrebbe non esserci una contropartita reale dell'oggetto modellizzato – bensì al modello mentale che quella gestualità sottintende: una rappresentazione intuitiva che permette di anticipare i risultati dell'agire, facilitandone le sperimentazioni. Il poter gestire metafore del gesto strumentale, rende la pratica della modellizzazione un processo empirico e intuitivo, attraverso cui il musicista costruisce i suoi modelli come

⁶⁶ «Questa proprietà è particolarmente interessante dal punto di vista musicale; si può infatti pensare al controllo dello strumento simulato in termini degli stessi parametri usati per il controllo del corrispondente strumento reale; tali parametri possono essere forniti dall'esecutore attraverso trasduttori ed attuatori, che permettono di riprodurre interventi gestuali che fanno parte dell'esperienza del musicista». FREGNAN, *Controllo gestuale di modelli fisici per la sintesi sonora di membrane percosse* cit., p. 10.

⁶⁷ WILLIAM GAVER, *How Do We Hear in the World?: Explorations in Ecological Acoustics*, «Ecological Psychology», V (1993), pp. 285-313.

se fossero oggetti reali, promuovendo, così, una 'impressione di realtà' mediante la loro implementazione.

Nel campo dell'elaborazione digitale del suono non sono più i vincoli meccanici a intervenire, ma le caratteristiche della percezione, che impongono come limiti le capacità uditive di discriminazione. Così, i limiti dell'acustica digitale dipendono dalle capacità differenziali della percezione piuttosto che dai vincoli della meccanica. A tal proposito, Risset, al Colloquio sui modelli fisici tenutosi all'ACROE nel settembre 1990, in riferimento allo stato attuale e alle prospettive dei modelli fisici sottolineava come l'acustica musicale non fosse affatto priva di meccanica, ma che ne traesse ispirazione e, al contempo, partecipasse al suo sviluppo.⁶⁸

Implicando processi intuitivi, che recuperano categorie della complessità del fenomeno, la modellizzazione si radica nei processi meccanicistici, e ne spiega, in parte, il gesto, mirando soprattutto a inglobare, all'interno del modello, procedimenti di tipo non-lineare. Nell'utilizzare un materiale acustico non più costituito nel dominio del tempo reversibile della meccanica classica, «oggi di colpo i musicisti possono accedere a una visione spogliata di schemi meccanicistici, di immagini transitive di causalità lineare; il musicista può imparare dalla tecnologia come trasformare energia e liberare le proprie intuizioni dinamiche».⁶⁹

In ultima analisi, il criterio è la percezione del soggetto e, in tal senso, può risultare interessante sfruttare tutte le possibilità del suono digitale che non sono disponibili nel campo dei suoni meccanici, ad esempio aumentando all'infinito la frequenza di un suono pur mantenendolo nel dominio udibile, come sperimentato da Shepard e dallo stesso Risset con la sintesi digitale:

Les psychoacousticiens et les musiciens continueront la quête fascinante de sons "immatériels", qui n'ont pas d'existence dans le monde physique, mais qui fondent leur identité – parfois très présente – sur la mise en jeu de processus perceptifs.

La "beauté est dans l'œil de celui qui regarde" – ou dans l'oreille de celui qui écoute. Aussi peut-on considérer les modèles physiques et les modèles de traitement du signal comme deux démarches importantes et complémentaires qui doivent aider, chacune à leur

⁶⁸ RISSET, *Le son numérique : une acoustique affranchie de la mécanique ?* cit., p. C1-10.

⁶⁹ HUGUES DUFOURT, *Difficoltà di una presa di coscienza teorica*, in *Teoria e prassi della musica nell'era dell'informatica*, scritti raccolti e tradotti da Agostino Di Scipio, Giuseppe Laterza editore, Bari 1995, p. 31.

façon, à enrichir les modèles perceptifs. Car, évidence souvent oubliée, ce qui fait l'importance des vibrations acoustiques, en dépit de leur faible énergie, c'est d'abord le fait qu'on les entend.⁷⁰

⁷⁰ RISSET, *Le son numérique : une acoustique affranchie de la mécanique ?* cit. p. C1-10.

1.3 Le tecniche della modellizzazione fisica e le implementazioni per la composizione musicale

Nel ripercorrere origini e storia della sintesi per modelli fisici, Vesa Välimäki e Tapio Takala affermano che «the roots of physical modelling lie in the history of mathematics and physics».⁷¹ Alcuni principi utilizzati attualmente, infatti, sono stati elaborati fin dal XVIII secolo, da matematici quali D'Alembert, Eulero, Bernoulli e Lagrange, mentre la maggior parte dei concetti, della terminologia, e alcune delle formule utilizzate oggi nella sintesi per modelli fisici possono essere ricondotte ai trattati scientifici ottocenteschi sulla natura del suono, secolo in cui vennero costruiti numerosi modelli meccanici per simulare la fisica degli strumenti musicali.⁷²

Lo sviluppo più importante consistette nella formalizzazione dell'equazione delle onde, derivata da un semplice sistema fisico e conosciuta anche come equazione di Helmholtz, la quale descrive come le onde in generale, comprese le vibrazioni meccaniche, si propagano in un mezzo omogeneo.⁷³ Alla fine degli anni Sessanta dell'Ottocento, Lord Rayleigh, dopo aver letto il lavoro di Helmholtz *Die Lehre von der Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik*, definì i principi di sistemi come membrane, lastre, barre, e conchiglie vibranti tramite la descrizione fisico-matematica delle vibrazioni all'aperto, in tubi, e in scatole.

Nel Novecento, dopo l'invenzione del tubo a vuoto, furono costruiti diversi modelli elettronici analogici.⁷⁴ Particolarmente rilevante, a proposito, fu la ricerca di Harry Ferdinand Olson⁷⁵ per il circuito analogico di modelli fisici delle percussioni, degli strumenti ad ancia labiale, degli strumenti ad ancia aria, degli strumenti ad arco, e della

⁷¹ VESA VÄLIMÄKI – TAPIO TAKALA, *Virtual Musical Instruments – Natural Sound Using Physical Models* «Organised Sound», II (1996), pp. 75-86: 77

⁷² Cfr. JOHN WILLIAM – STRUTT BARON RAYLEIGH, *The Theory of Sound*, 2 voll., Cambridge University Press, Cambridge 2011 (1^a ed. 1877).

⁷³ Cfr. In part. HERMANN VON HELMHOLTZ, *Die Lehre von der Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik*, Druck und Verlag von Friedrich Vieweg und Sohn, Braunschweig 1875; JOHN HENRY POYNTING – JOSEPH JOHN THOMSON, *A Textbook of Physics: Sound* 1900, Charles Griffin, London 1900; JOHN TYNDALL, *Sound*, 3^a ed., The Werner Company, Akron Ohio 1875; ALFRED M. MAYER, *Sound: A Series of Simple, Entertaining, and Inexpensive Experiments in the Phenomena of sound*, Appleton, New York 1878.

⁷⁴ Cfr. JOHN QUINCY STEWARD, *An Electrical Analogue of the Vocal Organs*, «Nature», CX (1922), pp. 311-312; DAYTON CLARENCE MILLER, *Anecdotal History of the Science of Sound to the Beginning of the 20th Century*, «Nature», CXXXVII (1936), pp. 1013-1014; KENNETH STEVENS – STANLEY KASOWSKI – GUNNAR FANT, *An Electrical Analog of the Vocal Tract*, «Journal of the Acoustical Society of America», XXV (1953), pp. 734-742.

⁷⁵ HARRY FERDINAND OLSON, *Music, Physics, and Engineering*, 2^a ed, Dover, New York 1967.

voce, sebbene il progredire delle tecniche sia stato piuttosto lento sino all'avvento dell'era del computer.

Il primo esempio di sintesi digitale del suono per modelli fisici fu creato, nel 1961, da John L. Kelly e Carol C. Lochbaum, in collaborazione con Max Mathews, presso i Bell Telephone Laboratories, nel contesto di una più ampia ricerca sulla sintesi vocale. Questi ultimi progettaronο un algoritmo per simulare il tratto vocale umano, rappresentato come connessione di diversi cilindri con diverse lunghezze e larghezze collegati con giunzioni di dispersione (Kelly e Lochbaum, 1962)⁷⁶. Forse a causa della morte prematura di Kelly, o anche perché i modelli spettrali si dimostrarono più efficaci, la ricerca sui modelli analogici del tratto vocale si affievolì, sebbene tale modello verrà ripreso da Perry Cook per la sintesi della voce cantata negli anni Novanta.⁷⁷

Dopo questo primo esperimento, finalizzato a scopi commerciali, i primi tentativi di usare un modello fisico per la sintesi del suono furono fatti da Lejaren Hiller e Pierre Ruiz, nel 1971,⁷⁸ i quali elaborarono un modello di corda digitale in vibrazione, simulata mediante l'archetipo massa-molla, oggi considerato il primo esempio del 'metodo classico'. Tale tecnica, computazionalmente molto intensa, e allora non utilizzabile in tempo reale,⁷⁹ piuttosto che per costruire modelli per la creazione di musica, risultò, allora, fondamentale per studiare la fisica degli strumenti musicali.

Il loro lavoro inaugura idealmente un nuovo filone di ricerca all'interno del più generale campo della modellizzazione fisica, in seguito definito mediante l'espressione *Physically-Based Modeling*. Apparsa negli anni Novanta, tale definizione esprimeva la

⁷⁶ JOHN L. KELLY – CAROL C. LOCHBAUM, *Speech Synthesis*, in *Proceedings of the 4th International Congress on Acoustics*, Copenhagen 1962, Paper G42, pp. 1-4, ristampato in *Speech Synthesis*, edited by James L. Flanagan and Lawrence R. Rabiner, Dowden, Hutchinson and Ross, Stroudsburg 1973, pp. 127-130; JOHN L. KELLY – CAROL C. LOCHBAUM, *Speech Synthesis*, in *Proceedings of the Stockholm Speech Communication Seminar*, Stockholm 1962, Paper F7.

⁷⁷ PERRY COOK, *Identification of Control Parameters in an Articulatory Vocal Tract Model, with Applications to the Synthesis of Singing*, PhD. thesis Stanford University (CCRMA), 1990; COOK, *SPASM: A Real-Time Vocal Tract Physical Model Editor/Controller and Singer: The Companion Software Synthesis System*, «Computer Music Journal», XVII (1992), pp. 30-44.

⁷⁸ LEJAREN HILLER – PIERRE RUIZ, *Synthesizing Musical Sounds by Solving the Wave Equation for Vibrating Objects*, «Journal of the Audio Engineering Society», XIX (1971), part I: pp. 462-470, part II, pp. 542-551.

⁷⁹ Questa linea di modellizzazione fisica ha continuato a essere utilizzata da Chaigne, Askenfelt e Jansson: cfr. ANTOINE CHAIGNE – ANDERS ASKENFELT, – ERIC V. JANSSON, *Temporal Synthesis of String Instrument Tones*, in «Quarterly Progress and Status Report», IV (1990), pp. 81-100; CHAIGNE, *On the Use of Finite Differences for Musical Synthesis. Application to Plucked Stringed Instruments*, «Journal d'Acoustique», V (1992), pp. 181-211.

necessità di concepire una forma di modellizzazione specificamente orientata a sperimentare le potenzialità creative della sintesi per modelli fisici:

In this context, anyhow, models are evaluated mainly through subjective judgments, and have no interest apart their possible musical uses. The study of reality is neither a aim but, when needed, a tool for further research, and precision in modeling is not the major aim. Moreover, modeling does not necessarily call for a study or an analysis of any real instrument, but more for a *synthesis* process: ideally the model emerges from a construction of “physically-relevant” building blocks. Based on these characteristics, one may say that the activity in the field is concerned with Physically-Based Modeling (PBM) or Synthesis – as opposed to traditional PM.⁸⁰

In tale passo, si enfatizza la centralità del processo di progettazione, piuttosto che la proprietà dei modelli stessi: un modello è *basato fisicamente* se il focus del progetto è incentrato sullo studio e la modellizzazione delle più importanti e significative proprietà di alcuni meccanismi di generazione del suono del mondo reale, indipendentemente dagli strumenti e dai concetti utilizzati per progettarlo.

All’interno di tale contesto, dopo gli studi di Hiller e Ruiz, sono stati introdotti diversi approcci alla modellizzazione fisica in grado di generare modelli di sorgenti sonore: oltre al summenzionato metodo classico, si possono annoverare lo schema modulare di interazione di massa, l’approccio modale, lo schema per guida d’onda, e l’approccio non lineare *black-box*.

In ciascuno di tali formalismi, l’oggetto vibrante è simulato mediante un sistema, – influenzato solo da mezzi di controllo ben definiti – che ha ragioni e peculiarità proprie, derivanti dalla causalità della sorgente capace di produrre suoni naturalmente significativi per le nostre orecchie, e le cui diverse dimensioni sono coerentemente legate alla fisicità del processo che li ha generati. Così, se la modellizzazione fisica di interazione di massa (in ambienti quali Cordis-Anima, Tao, Cymatic) si concentra sulla costruzione di oggetti virtuali composti da moduli fisici elementari (masse, molle, attrito) collegati tra loro, la sintesi per guida d’onda si focalizza sulla modellizzazione delle onde sonore che si propagano in un dato mezzo, attraverso il ricorso a linee di ritardo e filtri

⁸⁰ CASTAGNÉ – CADOZ – JEAN-LOUP FLORENS, *Physically-Based Modeling and Music vs. Physical Modeling and Acoustics*, in *International Congress on Acoustics 2004*, Kyoto 2004, pp. [1-5]: [1].

digitali, mentre la sintesi modale si basa sul calcolo dei modi di vibrazione degli oggetti materiali.

Tali differenze di metodo hanno un impatto sulla modularità dei modelli prodotti: i modelli di interazione di massa sono intrinsecamente modulari e questo permette lo sviluppo di ambienti di modellizzazione che lasciano molta libertà all'utente, che può combinare i diversi moduli elementari per creare modelli i cui comportamenti di alto livello (propagazione delle onde, aspetto dei modi di vibrazione) emergono dalle proprietà fisiche dei moduli assemblati, mentre altri metodi di modellizzazione, come le guide d'onda e la sintesi modale, risultano essere modulari nella misura in cui gli oggetti concettuali che manipolano, non corrispondono direttamente a oggetti materiali elementari, ma a fenomeni fisici (onde o modi di vibrazione).

Se nel corso degli anni successivi, vennero elaborati dei software basati su algoritmi stabili per implementare diversi metodi di modellizzazione (Genesis, Modalys, Cymatic, etc.), nello stesso periodo Perry Cook iniziò a sviluppare la Synthesis ToolKit,⁸¹ presso il CCRMA dell'Università di Stanford, aggiungendo capacità in tempo reale e ampliando notevolmente le tecniche di sintesi disponibili, con l'esigenza di sviluppare ambienti progettati per la prototipazione rapida di programmi di sintesi musicale e di elaborazione audio che potessero, però, consentire una programmazione multiplatforma in grado di collegare differenti ambienti di lavoro, in funzione delle diverse esigenze artistiche e musicali. Successivamente, furono elaborati altri toolkit che implementano diversi approcci di modellizzazione fisica, quali PMPD (Physical modelling per Pure Data), PMSC (una trasposizione della libreria di PMPD su PureData), MSD (Mass Spring Damper, una versione ottimizzata di PMPD) che permettevano all'utente di sfruttare la modularità degli ambienti in cui sono inclusi per costruire i propri modelli (principalmente PureData, Max/MSP, SuperCollider).

Nell'ultimo decennio, sulla scorta delle esigenze di un più facile accesso e di una più immediata facilità d'uso e di modellizzazione, inizia a essere utilizzato il linguaggio di programmazione Functional AUdio STreaming (FAUST), che consente, da un lato, di incorporare e ibridare tecniche di modellizzazione quali l'interazione di massa, la sintesi

⁸¹ Cfr. PERRY R. COOK – GARY P. SCAVONE, *The Synthesis ToolKit in C++ (STK)*, in <<https://ccrma.stanford.edu/software/stk/information.html>> (accesso 26-12-2020).

modale e la sintesi di guida d'onda digitale, e dall'altro, grazie al suo carattere modulare, di creare modelli complessi per applicazioni artistiche usando semplici blocchi di costruzione. Gli incroci dei diversi formalismi sono stati infine recentemente esplorati in Synth-A-Modeler, un nuovo strumento, libero e open-source, per la sintesi sonora modulare per modelli fisici, che simula ambienti audio-aptici virtuali.

Nei prossimi paragrafi si prenderanno in esame, in modo dettagliato, le tecniche di modellizzazione più significative per la costruzione di strumenti/oggetti per la sintesi del suono [fig. 1.1], mettendone in luce gli aspetti direttamente correlati alle ricadute sulla creatività e analizzando le tendenze e gli orizzonti che caratterizzano la storia della modellizzazione fisica in relazione alle pratiche compositive, un processo questo – analizzato più specificamente dal punto di vista della formalizzazione nel presente capitolo e dal punto di vista della produzione musicale nel prossimo – in continua evoluzione, punteggiato com'è da feconde collaborazioni, reciproche interazioni, mutue suggestioni. L'intento è quello di testimoniare quanto le specificità dei differenti formalismi della modellizzazione incida profondamente nella definizione della natura dello strumento virtuale e, di conseguenza, nella caratterizzazione stessa della letteratura musicale.

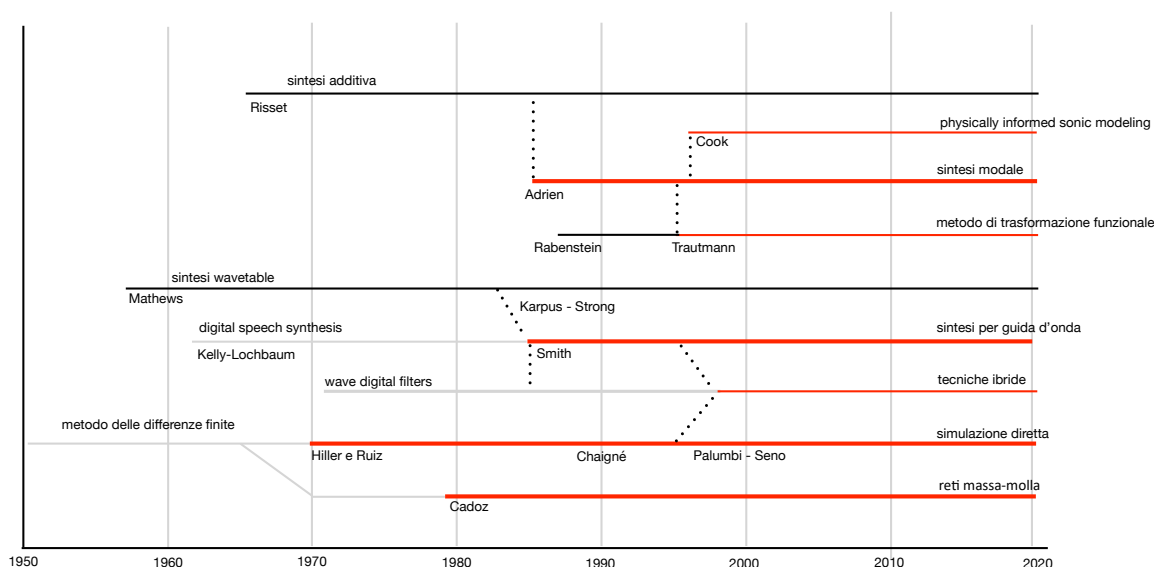


Fig. 1.1 Cronologia delle principali tecniche di sintesi per modelli fisici, trattate in questo capitolo, in riferimento alle pratiche compositive (linee rosse: linee solide per le principali famiglie, normali per le tecniche derivate da queste ultime). Le tecniche di sintesi del suono sono indicate da linee nere, quelle antecedenti al di fuori del campo della sintesi del suono 'musicale' da linee grigie, e i collegamenti da linee grigie tratteggiate (STEFAN BILBAO, Numerical Sound Synthesis: Finite Difference Schemes and Simulation in Musical Acoustics, Hoboken, NJ 2009, p. 2, con modifiche).

1.3.1 Il metodo classico (o analisi numerica)

L'approccio classico della sintesi del suono per modelli fisici è rappresentato dai lavori di Hiller e Ruiz, come già stato anticipato nei paragrafi precedenti, che, nel 1971, con una serie di studi preliminari, avviarono delle simulazioni di una corda vibrante, utilizzando le equazioni differenziali che governano le vibrazioni di una corda, e approssimando tali equazioni con il metodo delle differenze finite.

La descrizione fisica dell'oggetto vibrante implicava molti fattori quali la massa e l'elasticità dei corpi vibranti, le condizioni iniziali prima della vibrazione, le condizioni di 'contorno' (i valori limite che possono essere assunti dalle variabili), le caratteristiche dell'eccitatore e del risonatore (in molti casi retroattiva), l'impedenza (la resistenza opposta dai corpi alla vibrazione) e il filtraggio del risonatore.⁸² Il metodo prevedeva che l'equazione d'onda venisse poi risolta da un procedimento iterativo per approssimazioni successive, che tentava di trovare valori ragionevoli per molte variabili simultaneamente interdipendenti. Tale equazione genera un valore discreto del campione che rappresenta l'onda di pressione sonora in un dato istante di tempo.⁸³

La risoluzione dell'equazione per differenze – per le corde pizzicate, sfregate e percosse al centro, vicino alle estremità e al punto finale – sottintendeva la simulazione del comportamento della corda, mediante l'adozione del modello massa-molla, costituito da una serie di masse (elementi rigidi) e molle con ammortizzatori, tradizionalmente usato da fisici e fisici acustici per descrivere gli oggetti vibranti e le onde da essi emesse.⁸⁴ Correlato al metodo degli elementi finiti (FEM), utilizzato in ingegneria meccanica per simulare la vibrazione delle strutture, l'approccio suddivide l'oggetto in un gran numero di elementi nello spazio, i quali collegati agli elementi vicini tramite molle e micro ammortizzatori, al fine di imitare l'oggetto vibrante.

Tale modello enfatizza due qualità essenziali degli oggetti vibranti: la loro *densità* – la massa per unità di quantità del corpo vibrante, modellato da un certo

⁸² HILLER – RUIZ, *Synthesizing Sounds by Solving the Wave Equation for Vibrating Objects*, cit.

⁸³ Nell'approccio classico, i campioni di suono risultano, quindi, dalla valutazione delle equazioni di differenza che descrivono il comportamento vibrazionale degli oggetti fisici. Un'equazione di differenza, che coinvolge differenze e derivate di funzioni, viene solitamente invocata quando si descrive come un segnale cambia nel tempo. Cfr. ROADS *The Computer Music Tutorial* cit., p. 270.

⁸⁴ *Ivi*, pp. 269-270.

numero di masse distribuite su una data lunghezza – e la loro *elasticità*, modellata da molle che uniscono le masse. La divisione della corda in unità discrete (masse) permette di modellare l'eccitazione come una forza che viene applicata a una singola massa e poi si propaga alle altre masse. Se una corda viene allontanata dal suo punto di equilibrio, compare una forza opposta che tende a riportare la corda alla sua posizione iniziale: la corda inizia quindi a vibrare. Se la corda viene pizzicata, cioè se una massa viene mossa, essa esercita una tensione sulle masse vicine le quali, a loro volta, si muovono secondo un principio chiamato *propagazione dell'onda*. Con il sistema massa-molla, è possibile modellare sia onde longitudinali, sia onde trasversali, che rappresentano le principali modalità di vibrazione delle corde pizzicate, arcuate o percosse, permettendo di conoscerne la forma in un dato momento. Anche le superfici e i volumi possono essere rappresentati come una rete di masse e molle: nel caso di un diaframma a tamburo circolare, ad esempio, le masse sono disposte a 'stella', mentre i volumi sono modellati come un reticolo in cui ogni massa è collegata da molle sui sei lati.

L'approccio di Hiller e Ruiz, tuttavia, essendo particolarmente oneroso dal punto di vista computazionale, è stato sfruttato più che altro per le simulazioni non in tempo reale, e prevalentemente per scopi più scientifici che artistici. Come sottolinea Jean-Marie Adrien, il quale alla fine degli anni Ottanta sperimenterà la sintesi modale:

Les limites de l'approche de Hiller et Ruiz résultent du fait que les solutions analytiques sont de manière générale, trop arbitraires et insuffisantes à l'oreille ou trop complexes et inutilisables en pratique. Les auteurs négligent donc les possibilités de leur modèle en matière de contrôle, et réduisent ses performances en matière de transitoires⁸⁵.

Pertanto, di lì a poco, partendo dal sistema massa-molla, verranno sviluppate nuove tecniche più efficaci nella simulazione e nella modellizzazione di strumenti musicali, quali il formalismo Cordis-Anima, sviluppato dal centro ACROE e, successivamente, la sintesi modale: un'alternativa al paradigma massa-molla che aveva il vantaggio di essere ben più flessibile di quest'ultimo.

⁸⁵ JEAN-MARIE ADRIEN, *Simulation numérique de systèmes vibrants complexes : application à la synthèse sonore par modélisation physique*, Ph. D. thesis, Università di Parigi VI, Paris 1989, p. 6.

1.3.2 L'approccio modulare di interazione di massa: Cordis-Anima

Dal 1976 – anno di fondazione del centro ACROE di Grenoble –, Claude Cadoz, Jean-Loup Florens e Annie Luciani, pur partendo dal paradigma massa-molla, si discostano dal precedente modello di analisi numerica di Hiller e Ruiz, avviando lo studio della simulazione di uno strumento musicale attraverso sistemi di interazione di massa che operano principalmente nel dominio meccanico.⁸⁶ La rete di elementi di massa, collegati da molle, approssima il comportamento di un sistema distribuito nello spazio in cui l'elemento è discretizzato usando differenze finite: la differenza fondamentale tra le differenze finite e le tecniche delle reti di massa-molla consiste nel fatto che una rete è costruita collegando i moduli, piuttosto che discretizzando le equazioni di controllo per ogni passo.⁸⁷

Il modello Cordis, realizzato nel 1979, dal team di Acroe, rappresenta la prima tecnica per la modellizzazione fisica di oggetti/strumenti per il suono basata sul paradigma di interazione di massa. Tale modello fu presto affiancato dal sistema Anima, messo a punto, in particolare, da Annie Luciani, e compiutamente realizzato nel 1985, che utilizzava la modellizzazione fisica per la creazione di immagini animate. L'integrazione in un unico formalismo unificato Cordis-Anima⁸⁸ permetteva di simulare suoni di strumenti musicali, oggetti sonori e fenomeni naturali, e, nel contempo,

⁸⁶ Cfr. CLAUDE CADOZ, *Synthèse sonore par simulation de mécanismes vibratoires, application aux sons musicaux*, Ph. D. thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble, Grenoble 1979; CADOZ – ANNIE LUCIANI, *Responsive Input Devices and Sound Synthesis by Simulation of Instrumental Mechanisms: The Cordis System*, «Computer Music Journal», VIII (1984), pp. 60-73; FLORENS – CADOZ, *The Physical Model: Modeling and Simulating the Instrumental Universe*, in *Representations of Musical Signals*, edited by Giovanni De Poli, Aldo Piccialli, and Curtis Roads, The MIT Press, Cambridge, 1991, pp. 227-268.

⁸⁷ «The mass-spring networks work primarily in the mechanical domain and use a dual-pair of K-variables, such as position and velocity or force and velocity. In this technique, the physical system to be modelled is divided into lumped mass elements which are connected by springs and dampers (links). The mass elements correspond to the nodes of a network and are the smallest modules representing inertia. The links represent physical interactions between them. The network of lumped mass elements, connected by links, approximates the behaviour of a distributed system. Each element is discretized using finite differences and operates locally. The fundamental difference between the finite difference and the mass-spring networks techniques is that a network is built by connecting the modules, rather than discretizing the governing equation for each case. Delay-free loops are avoided by imposing a causality in the ordering of the operations. Usually, a delay is inserted between the computation of a K-pair, and the two-way interactions are computed in an interleaved fashion». VÄLIMÄKI – JYRI PAKARINEN – CUMHUR ERKUT – MATTI KARJALAINEN, *Discrete-Time Modelling of Musical Instruments*, «Report on Progress in Physics», LXIX (2006), pp. 1-78: 14.

⁸⁸ CADOZ – LUCIANI – FLORENS, *CORDIS-ANIMA: A Modelling and Simulation System for Sound and Image Synthesis: The General Formalism*, «Computer Music Journal», XVII (1993), pp. 19-29.

consentiva la modellizzazione della componente visiva.⁸⁹ All'interno di tale unificazione vengono integrati i vincoli del calcolo digitale in tempo reale, in modo che gli stati degli oggetti fisici siano descritti da variabili discrete che evolvono in passi temporali discreti.⁹⁰

In Cordis–Anima, le componenti degli oggetti fisici modellati sono scelte all'interno di una base generativa di componenti meccaniche elementari di due tipi: i punti materiali <MAT> e gli elementi di interazione <LIA>, che permettono di costruire qualsiasi oggetto complesso come una rete topologica piana, in cui le giunzioni sono gli elementi <MAT> e i collegamenti gli elementi <LIA>.⁹¹ I moduli <MAT> rappresentano elementi materiali puntuali, tra i quali il più utilizzato è il modulo MAS, che simula un'inerzia ideale. I moduli <LIA> rappresentano le interazioni fisiche tra coppie di moduli <MAT>, basate sull'elasticità lineare o non lineare e sull'attrito. Entrambi i moduli sono sottosistemi elementari e possono essere caratterizzati in termini delle loro relazioni input/output.⁹²

Oltre ai moduli lineari tradizionali (come punto fisso, inerzia, rigidità, smorzamento, etc., chiamati rispettivamente SOL, MAS, RES, FRO) – che simulano una vasta diversità di oggetti, quali strutture vibranti, eccitatori, agglomerati di particelle, fluidi, sabbie, materiali di definita plasticità, etc. –, sono definite due interazioni non lineari che permettono di modellare interazioni complesse tra gli oggetti, quali, ad esempio, le interazioni del pizzicato, le interazioni di collisione e non (percussioni nel caso di strutture vibranti, collisioni nel caso di oggetti animati visivamente), le interazioni di attrito, di scorrimento, di rotolamento, di ingranaggio, di attrito con corde d'arco, etc.⁹³

⁸⁹ CADOZ, *Concepts and Technologies for Multisensory and Interactive Simulation of Physical Objects* cit., p. 18.

⁹⁰ Oltre a Cordis-Anima, diversi altri sistemi sono costruiti su questa idea di base, ma con vincoli aggiuntivi sulla computazione, la generazione del suono o il controllo. Tali sistemi sono: PhyMod, PMPD, TAO e Cymatic.

⁹¹ Cfr. CADOZ – FLORENS – LUCIANI, *Responsive Input Devices and Sound Synthesis by Simulation of Instrumental Mechanisms* cit.

⁹² Così, i modelli Cordis-Anima sono costituiti dall'interazione di diversi moduli <MAT> e <LIA>, basati su alcune semplici regole di costruzione, incentrate su due variabili fondamentali: la *posizione* e la *forza*. Ad ogni campione un <LIA> calcola due forze opposte secondo la distanza relativa e/o la velocità dei due <MAT> che collega, mentre un <MAT> calcola la sua posizione secondo le forze che riceve dai moduli <LIA> a cui è collegato. cfr. CLAUDE CADOZ – ANNIE LUCIANI – JEAN LOUP FLORENS, *Cordis-Anima: A Modeling and Simulation System for Sound and Image Synthesis* cit.

⁹³ CASTAGNÉ – CADOZ, *Creating Music by Means of 'Physical Thinking': The Musician Oriented Genesis Environment*, in *Proceedings of the 5th International Conference on Digital Audio Effects (DAFX-02)*, Hamburg 2002, pp. 169-174: 171.

Non avendo forma di un diagramma orientato, ma di una rete i cui nodi e collegamenti (rispettivamente, elementi <MAT> e <LIA>), per principio doppi, creano interazioni bidirezionali, un modello elaborato in Cordis-Anima non è caratterizzato da una gerarchia predeterminata, ma da una qualsiasi gerarchia decisa dall'approccio di modellizzazione. Le proprietà dei modelli derivano, dunque, per 'emergenza', esclusivamente dalle proprietà locali delle loro componenti e dal modo in cui sono combinate nella rete. Sia gli oggetti a bassa frequenza (generatori di movimento) che quelli ad alta frequenza (generatori audio), infatti, possono essere combinati e fatti interagire secondo diverse scale temporali e spaziali, consentendo ai diversi elementi di trasformarsi l'uno nell'altro, commutando e/o sovrapponendo le loro funzioni, e costruendo una realtà sovra-congruente con il mondo fisico (§ 3.3).

Ne consegue, che i modelli tendono ad essere percepiti, non tanto come costruzioni matematiche o algoritmiche, bensì come oggetti che si definiscono mediante processi di interazione, all'interno di una simulazione in cui la sintesi del suono è, però, soltanto una delle sfaccettature di un approccio che permette di produrre anche i movimenti per le immagini animate e i sistemi utilizzati con interfacce gestuali: dai dispositivi *force-feedback* ai dispositivi aptici.⁹⁴

La modularità che caratterizza Cordis-Anima si estende alla possibilità di integrare il modello simulato in un ambiente multisensoriale in modo tale che un oggetto sonoro possa essere contemporaneamente visto, ascoltato e controllato dal gesto in alcuni dei suoi parametri. È questo l'obiettivo di *Retroactive Gestural Transducer*, o RGT, di Jean-Loup Florens, una tastiera, in cui ogni tasto può controllare un parametro del modello, che invia informazioni all'utente e, al tempo stesso, ne riceve, grazie alla presenza di motori magnetici sotto i tasti. Tale interazione, definita da Cadoz 'funzione ergotica', permette di agire in modo diretto e intuitivo sullo strumento fisico. Potendo sentire quest'ultimo attraverso il senso aptico, si agisce eseguendo il gesto in modo espressivo, producendo e trasformando i suoni, in modo tale che «we are able to achieve

⁹⁴ Questo rende possibile concepire dispositivi gestuali a ritorno di forza – un sistema di force feedback non è altro che un modulo <MAT> (o <LIA>) che produce un segnale di posizione (o forza) in risposta alla forza (o posizione) che gli imponiamo – che potremo definire aptici. Diciamo che un tale dispositivo, che combina intrinsecamente le due cose, è un Trasduttore Gestuale Retroattivo, (TGR). Cfr. CADOZ, *Instrumental Gestures and Musical Composition*, in *Proceedings of the 1988 International Computer Music Conference*, (ICMC 1988), Köln 1988, pp. 1-14.

what can be named “*interactive and multisensory simulation of physical objects*”; that is to say, a simulation of physical objects in such a way that we can interact physically (by our gestures) with their simulacra and perceive them, during this interaction, by the hearing, the vision and the haptic sense». ⁹⁵

In particolare, l’interfaccia grafica Genesis, sviluppata sin dagli esordi di Cordis-Anima, costituisce un vero e proprio ambiente compositivo che implementa un approccio di manipolazione diretta all’interazione uomo-computer, in modo che i compositori e i ricercatori possano interagire il più direttamente possibile con i moduli e gli oggetti durante la modellizzazione, controllandone in vari modi i parametri.

Negli ultimi anni, la vocazione per la interattività e la multisensorialità nella modellizzazione del paradigma Cordis-Anima si è evoluta in interfacce sempre più cross-modali e protese alla performance live, fino alla creazione di *Hélicanthe*, una piattaforma interattiva in tempo reale che integra Genesis e le tecnologie di base sviluppate da ACROE, in uno strumento completo per la creazione musicale e artistica multisensoriale (§ 2.2.2, 2.2.2.3).

1.3.2.1 Genesis: un ambiente per la creazione musicale

Basato sul formalismo Cordis-Anima, Genesis è stato introdotto e sviluppato da ACROE, a partire dagli anni Novanta, come ambiente software orientato al musicista per la creazione musicale con modellizzazione e simulazione basate su reti fisiche di interazione di massa. Attraverso il processo di costruzione delle reti fisiche, da cui emergono topologicamente gli oggetti, Genesis, con la sua interfaccia grafica, permette non soltanto di progettare e sperimentare modelli per la sintesi del suono, ma anche di fonderli con la composizione assistita dal computer.

A differenza di altri ambienti modulari – generalmente costituiti da un numero ridotto di elementi, anche se desunti da un insieme più grande di categorie con algoritmi complessi, come, ad esempio, Modalys – i modelli di Genesis offrono la possibilità di costruire enormi insiemi di moduli indipendenti all’interno dei modelli che creano un

⁹⁵ CADOZ, *Concepts and Technologies for Multisensory and Interactive Simulation of Physical Objects* cit., p. 23.

ecosistema coerente, al cui interno le masse e le loro interazioni, al di là del loro interesse fenomenologico, costituiscono la base di un linguaggio musicale modulare, finalizzato a produrre non tanto suoni isolati, bensì veri e propri *segni* musicali, naturalmente orientati alla composizione. In tal senso, la caratteristica nevralgica dell'ambiente Genesis risulta essere la multi-scalarità funzionale degli oggetti modellizzati, un aspetto fondamentale, quest'ultimo, che permette al musicista di accostarsi alla composizione in modo intuitivo, ma soprattutto organico e coerente: dalla creazione dello strumento a quella del gesto, fino all'organizzazione di unità formali complete e autonome.⁹⁶

Il nucleo operativo del sistema è il *workbench*, uno spazio 2D pensato come una pagina bianca su cui gli artisti possono 'esplorare' – costruendo un *corpus* di oggetti e modificandone le strutture e/o i parametri –, 'orchestrare' – raccogliendo una collezione di modelli molto diversi e organizzandoli in funzione dell'esigenza estetica –, 'comporre' – attraverso strategie e strumenti volti ad organizzare i modelli nel tempo e ad elaborare una notazione musicale sul banco stesso – e, infine, 'scrivere' gli eventi come una partitura, ricorrendo a dei *trigger*, in genere uno per ogni evento, costruiti da un solo modulo di massa e collegati agli 'strumenti' per mezzo di interazioni non lineari, che gestiscono nel tempo l'eccitazione dello strumento e la sua esecuzione [fig. 1.2].⁹⁷

Oltre al *workbench*, vi sono due altri spazi di lavoro indipendenti, in cui i modelli e le loro proprietà vengono descritti mediante rappresentazioni specifiche e complementari: la *finestra di simulazione* [fig. 1.3] – generalmente dedicata ad animare graficamente i modelli in uno spazio di lavoro 3D –,⁹⁸ la quale, oltre a calcolare il suono simulato, ne visualizza la forma d'onda e ne permette l'esportazione come file AIFF; e la *finestra di analisi modale* che permette la decomposizione e la visualizzazione di

⁹⁶ I musicisti hanno a che fare con grandi modelli multi-scala che mescolano oggetti ad alta e bassa frequenza collegati tra loro. Questi modelli rappresentano sia oggetti sonori che una rappresentazione di gesti musicali.

⁹⁷ Gli utenti possono anche scegliere di organizzare gli eventi mediante dei trigger che possono essere visualizzati e modificati in un'apposita finestra, (un sequencer dedicato). Una volta identificati come trigger sul banco, appariranno sulle timeline. Cfr JÉRÔME VILLENEUVE – CADOZ – CASTAGNÉ, *Visual Representation in GENESIS as a Tool for Physical Modeling, Sound Synthesis and Musical Composition*, in *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression*, Baton Rouge 2015, pp. 195-200: 199.

⁹⁸ Questo rendering 3D è dotato di numerosi strumenti di navigazione e di impostazioni della telecamera. Il modello, così, può essere riprodotto sincronicamente con il suono sintetizzato, o può essere visto indipendentemente. In questo caso, l'animazione può essere calcolata a 44100 frame/sec e il tempo allungato per visualizzare un frame al secondo. Cfr. *ivi*, p. 196.

specifiche proprietà acustiche di qualsiasi rete fisica lineare costruita sul banco Genesis, in modo che gli utenti possano stabilire *connessioni percettive* tra il modello e i suoi parametri, creati nel *workbench*, e la natura del suono e del movimento prodotti nella simulazione. Il suono, infatti, è il risultato diretto del movimento del modello nel tempo, un movimento che viene, nel contempo, anche visualizzato.

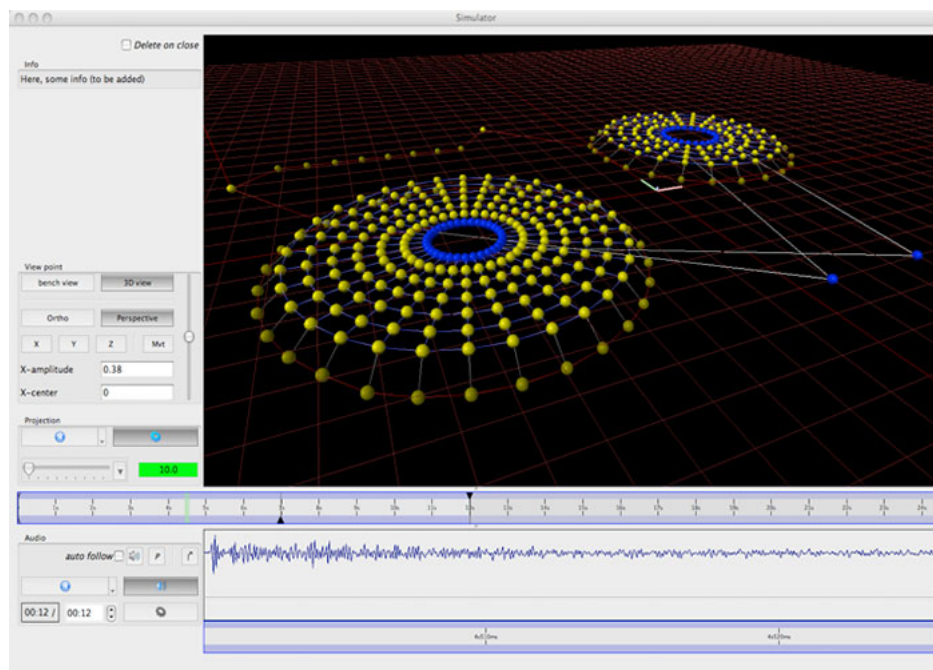


Fig. 1.2 Finestra di simulazione in Genesis di due gong con il suo layout completo: l'utente può ascoltare il suono senza soluzione di continuità, lanciare il processo di visualizzazione 2D+1, proseguire la simulazione, etc. (da NICOLAS CASTAGNÉ – CLAUDE CADOZ, G3: Genesis Software Environment Update, in Proceedings of the international Computer Music Conference, Montreal 2009, p. 410).

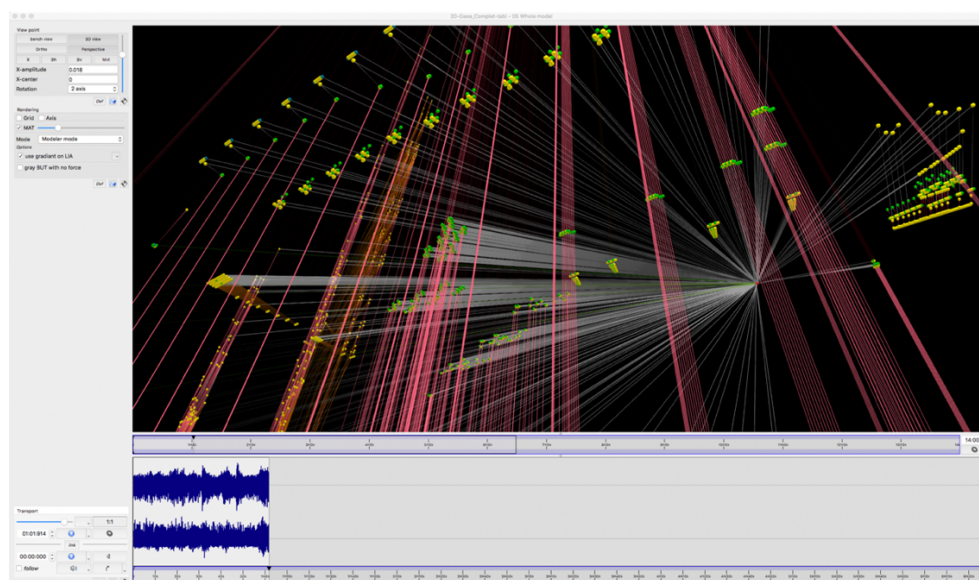


Fig. 1.3 Finestra di simulazione Genesis del brano Gaea di Cadoz – (da CLAUDE CADOZ, Concepts and Technologies for Multisensory and Interactive Simulation of Physical Objects, in Proceedings of the 15th Sound and Music Computing conference, Limassol, Cyprus 2018, p. 26).

La base di Genesis è costituita dalla versione ‘uni-dimensionale’, o ‘topologica’ di Cordis-Anima, in cui ogni variabile fisica (posizione, forza) è calcolata lungo un singolo asse di movimento. Il lavoro del musicista consiste nell’assemblaggio di elementi in una rete di 12 moduli elementari semplici, 7 parametri fisici e 2 proprietà dello stato iniziale, ognuno dei quali rappresenta una legge di comportamento fisico elementare: inerzia, rigidità, viscosità, interazione non lineare, etc. [fig. 1. 4].⁹⁹

I parametri del modello vengono, così, impostati dal musicista in modo intuitivo secondo proprietà non percettive (uditive, visive o aptiche), bensì meccaniche (inerzia, elasticità del materiale, attrito etc.), mentre gli algoritmi di simulazione calcolano, da tali proprietà, gli stati degli elementi di questa ‘materia virtuale’ che si succedono ad ogni passo del campionamento temporale.

Name	Parameters	Description
<MAT> Physical Modules		
MAS	Inertia	Punctual mass
SOL	None	Fixed point
CEL	Inertia, Stiffness, Damping	Elementary physical oscillator
<LIA> Physical Modules		
RES	Stiffness	Elasticity
FRO	Damping	Viscosity
REF	Stiffness, Damping	Visco-Elasticity
BUT	Stiffness, Damping, Threshold	Visco-Elasticity conditioned by a position difference
LNL	f(position) lookup table f(speed) lookup table	General non-linear interaction
In/Out Modules		
SOX	None	Fixed point. Sends position of connected <MAT> to output
SOF	None	Fixed point. Sends received force to output

Fig. 1.4 Lista dei moduli fisici in Genesis (da JAMES LEONARD – CLAUDE CADOZ, Physical Modelling Concepts for a Collection of Multisensory Virtual Musical Instruments, in Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression, Baton Rouge 2015, p. 152).

⁹⁹ CASTAGNE – CADOZ, G3: Genesis Software Environment Update, Proceedings of the international Computer Music Conference (ICMC 2009), Montreal 2009, pp. 407-410.

Grazie alle potenzialità multiscalarì, offerte dalla modularità della rete, degli oggetti modellizzati, è possibile distinguere, mediante la metafora musicale, due differenti categorie di moduli: gli 'strumenti', moduli ad alta frequenza produttori di suono, e gli 'strumentisti', moduli a bassa frequenza utilizzati come generatori gestuali.¹⁰⁰ La possibilità di combinare questi due tipi di modelli e farli interagire, costituisce un aspetto fondamentale dell'utilizzo di Genesis per la composizione musicale, che consente di osservare il movimento di queste parti nello stesso spazio di simulazione, riproducendo l'animazione del modello indipendentemente dal suono, rallentandola da 44100 frame/sec a 1 frame/sec.

Oltre alle due categorie strumenti e strumentisti, attraverso una terza categoria costituita da *trigger* vengono introdotte nuove scale temporali e spaziali – elementi molto lenti, ad esempio, efficaci solo per pochi secondi dopo l'inizio di un pezzo, oppure con una disposizione spaziale lontana dagli oggetti su cui tali elementi agiscono – che si possono visualizzare e comprendere all'interno della *finestra di simulazione*, monitorando ciò che accade e collegando ciò che si percepisce direttamente alle proprietà del modello¹⁰¹. Questo implica che quando si usa Genesis, gli artisti possano concentrarsi essenzialmente sul suono ma anche considerare come oggetto della loro creazione ciò che viene visualizzato nello spazio di lavoro della simulazione.¹⁰² Ludger Brümmer e Silke Braemer in *Le temps s'ouvre (Thrill)*, del 1999, hanno usato Genesis come uno strumento multimodale che produce sia suono che immagini animate usate come materia prima per la creazione di video post-trattati. Più recentemente, Cadoz ha suonato pubblicamente il suo pezzo *Gaea* (2007) e altre composizioni direttamente dallo spazio di lavoro della simulazione navigando, contemporaneamente, nella visualizzazione del modello. Ne consegue che il pubblico viene guidato in un viaggio immersivo di visualizzazione coerente del modello durante l'ascolto.

In tal senso, la finestra di simulazione può essere concepita come un ambiente completo di *sintesi audiovisiva*, forse il primo del suo genere, il cui nucleo, costituito da

¹⁰⁰ Cfr. VILLENEUVE – CADOZ – CASTAGNÉ, *Visual Representation in GENESIS* cit., p. 197.

¹⁰¹ Avere una rappresentazione visiva dell'ambiente virtuale in cui i modelli fisici sono simulati permette anche osservazioni quantitative. In questo caso, e solo utilizzando i moduli elementari CORDIS-ANIMA, si possono costruire modelli metrologici e sperimentare e misurare "empiricamente" le proprietà delle strutture dinamiche direttamente nello spazio di lavoro della simulazione. Cfr. *ivi*, p. 197.

¹⁰² Cfr. *ivi*, p. 200.

un unico modello fisico, è responsabile della produzione audio e viso-motoria intrinsecamente collegata senza necessità di alcuna mappatura, sebbene la relazione con le sensorialità si basi su accorgimenti che non influenzano le proprietà simulate. Infatti, tali proprietà simulate non vengono influenzate dalla visualizzazione dei movimenti dei punti materiali nella rappresentazione prospettica tridimensionale, né dall'estrazione del segnale acustico dai movimenti di alcuni punti selezionati e, nelle simulazioni online, dalla ricezione e la produzione di segnali aptici da o verso altre selezioni di punti particolari.

Un modo per comprendere la connessione che è possibile stabilire tra un modello lineare e la varietà di suoni che usciranno dalla sua simulazione consiste nel proiettare questo modello nella finestra dell'analisi modale. Mediante tale finestra si può apprendere ogni dettaglio dei modi di vibrazione della struttura, osservandone la forma, e potendo anticipare, senza simulazione, le caratteristiche principali del suono che questo oggetto produrrà [fig. 1.5]. Ciò permette, ad esempio, di identificare chiaramente i nodi e gli antinodi della struttura vibrante, e, in definitiva, di determinare dove agire in base ai modi/parti che si ritiene debbano essere predominanti o meno.

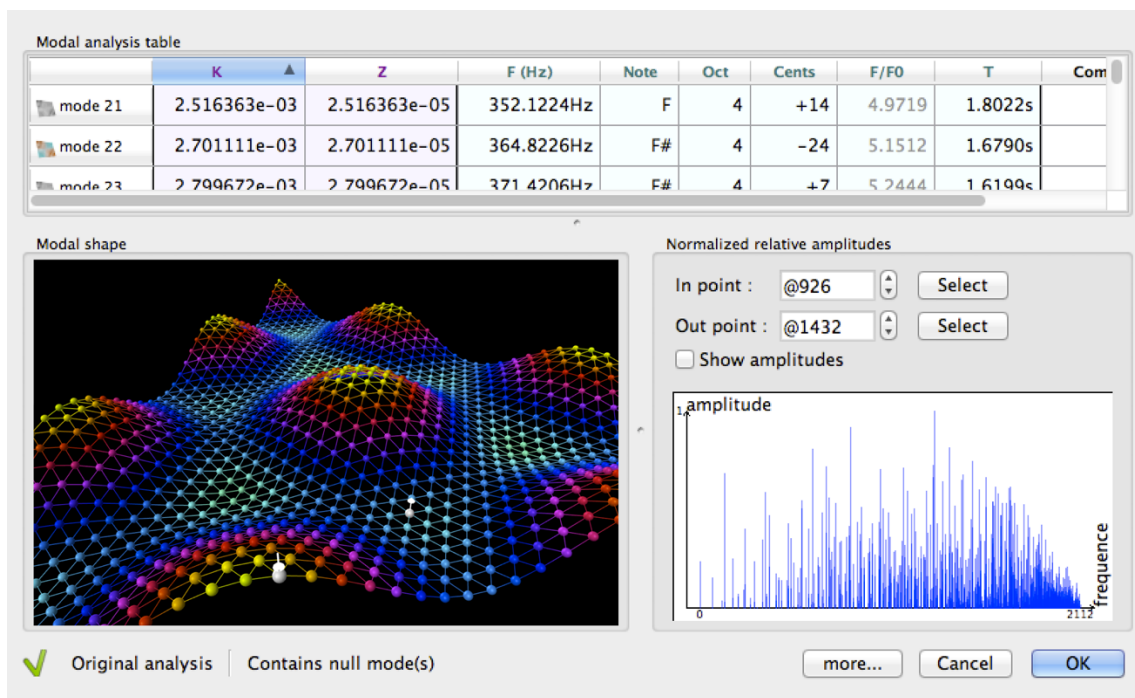


Fig. 1.5 Finestra dell'analisi modale in Genesis (da JÉRÔME VILLENEUVE – CLAUDE CADOZ – NICOLAS CASTAGNÉ, Visual Representation in GENESIS as a tool for Physical Modeling, Sound Synthesis and Musical Composition, in Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression, Baton Rouge 2015, p. 198).

Pertanto, l' 'interazione fisica strumentale' all'interno della rete Cordis-Anima rappresenta un tipo di controllo totalmente fisico ed energeticamente coerente, dato che non si influenzano i parametri del modello, ma si applicano forze agli elementi <MAT> attraverso gli elementi <LIA> che, avendo una forte controparte fisica, risultano pertinenti ai sensi umani, come nella realtà.

I modelli fisici, dunque, permettono una rappresentazione intuitiva dell'azione che si compie con gli oggetti reali. È possibile, infatti, immaginare diversi gesti fisici per manipolare e controllare il modello: scaricare, tirare, spingere, etc. Come sottolinea Castagne, la fase di progettazione permette un approccio puramente fisico promosso dal 'physical thinking': "models are more easily internalised as representations of real objects than more mathematical physical modelling or signal processing techniques".¹⁰³ Così, risulta possibile prevedere il comportamento generale di un modello esaminando la sua rete senza l'uso di strumenti di analisi matematica.¹⁰⁴

¹⁰³ ALEXANDROS KONTOGEORGAKOPOULOS – CADOZ, *Cordis-Anima Physical Modeling and Simulation System Analysis*, in *Proceedings of the 4th Sound and Music Computing Conference*, Lefkada 2007, pp. 275-282: 277.

¹⁰⁴ CASTAGNE - CADOZ, *Creating Music by Means of 'Physical Thinking'* cit.

Se la simulazione in tempo differito e senza l'uso di interfacce gestuali con ritorno di forza rende possibile una precisione assai accurata, fin dall'inizio c'è stata la tendenza di ACROE-ICA a sviluppare l'interazione strumentale in tempo reale con i modelli Cordis-Anima, che ha condotto alla progettazione e al perfezionamento di sistemi aptici, sempre più presenti nelle nuove interfacce musicali, i quali mirano ad ottenere un accoppiamento fisico tra musicista e strumento simulato in un modo il più vicino possibile all'interazione fisica del mondo reale, con una rappresentazione accurata dello scambio bidirezionale di energia.¹⁰⁵

Per raggiungere tale 'accoppiamento' fisico, le soluzioni tecniche si basano su interfacce aptiche ad alte prestazioni e a cicli di calcolo sincronizzati ad alta velocità. In questo modo, tali sistemi mirano a catturare la sensazione, la suonabilità e l'espressività degli strumenti acustici, e, al contempo, si aprono alle nuove possibilità della sintesi del suono di modellizzazione fisica.

Dal primo dispositivo aptico finalizzato all'accoppiamento dinamico con lo strumento simulato, progettato da Florens nel 1978,¹⁰⁶ la ricerca si è evoluta nella tecnologia aptica ad alta fedeltà ERGOS¹⁰⁷ sviluppata da ACROE e ERGOS Technologies, e utilizzata, a partire dal 2012, in Genesis-Rt, una piattaforma di realtà virtuale per la creazione musicale, basata per la prima volta sull'integrazione di tre componenti fondamentali: il formalismo di modellizzazione e simulazione fisica Cordis-Anima, il modellizzatore interattivo Genesis per la creazione musicale, e la tecnologia aptica ERGOS ad alta fedeltà [fig. 1.6].

¹⁰⁵ Cfr. JEAN-LOUP FLORENS, *Real Time Bowed String Synthesis with Force Feedback Gesture*, «Acta Acustica», LXXXVIII (2002), s.n.p.; STEPHEN SINCLAIR – MARCELO M. WANDERLEY – VINCENT HAYWARD – GARY SCAVONE, *Noise-Free Haptic Interaction with a Bowed String Acoustic Model*, in *Proceedings of the World Haptics Conference*, Istanbul 2011, s.n.p.

¹⁰⁶ FLORENS, *Coupleur gestuel interactif pour la commande et le contrôle de sons synthétisés en temps réel, Interface homme-machine* [cs.HC], Ph. D thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 1978.

¹⁰⁷ FLORENS - LUCIANI - CADOZ – CASTAGNÉ, *ERGOS: Multi-Degrees of Freedom and Versatile Force-Feedback Panoply*, *EuroHaptics 2004*, München 2004, pp. 356-360.

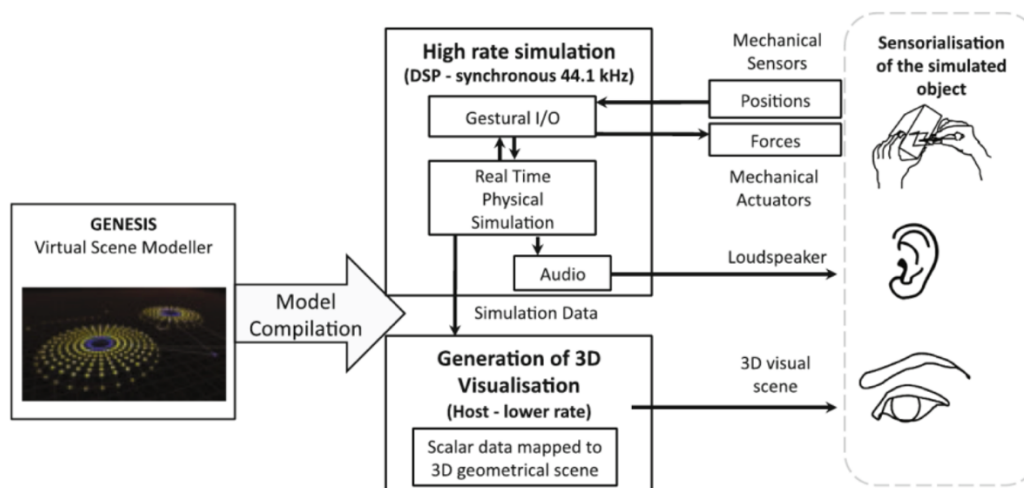


Fig. 1.6 La piattaforma di realtà virtuale Genesis-RT (da JAMES LEONARD, CLAUDE CADOZ, NICOLAS CASTAGNE AND ANNIE LUCIANI, A Virtual Reality Platform for Musical Creation in Proceedings of the 10th International Symposium on Computer Music Multidisciplinary Research, Marseille 2013, p. 272).

In particolare, il dispositivo aptico TGR (*Transducteur Gestuel Rétroactif*), che è integrato direttamente nel modello Cordis-Anima come una serie di moduli MATT-GR, concentrandosi su un'alta risposta dinamica, un elevato feedback di forza di picco (fino a 200 N) e un design modulare basato su *slice*, permette l'adattamento a vari tipi di gesti: tasti di pianoforte 1D [fig. 1.7], joystick 3D, sistema di archi, etc.¹⁰⁸ In tandem con il dispositivo aptico stesso, l'elettronica dedicata fornisce l'alimentazione necessaria per gli attuatori e il condizionamento dei segnali dei sensori, e la piattaforma è collegata a un sistema di simulazione digitale in tempo reale che permette di interfacciare il dispositivo aptico con una simulazione sincrona ad alta velocità del modello fisico.¹⁰⁹

Genesis-Rt, in tal senso, può essere considerata una piattaforma VR multisensoriale completa per la creazione musicale, che permette di realizzare una 'realtà virtuale strumentale', dotata di una sezione di modellizzazione in cui il musicista è in grado di progettare il proprio strumento musicale o oggetto sonoro su base fisica in modo interattivo, e di una seconda sezione in cui è consentita l'interazione multisensoriale con gli strumenti progettati, attraverso un feedback uditivo, visivo e aptico coerente. Il feedback degli oggetti fisici manipolati avviene – per la prima volta

¹⁰⁸ FLORENS – LUCIANI – CADOZ – CASTAGNÉ, *ERGOS: Multi-Degrees of Freedom and Versatile Force-Feedback Panoply* cit.

¹⁰⁹ Cfr. VANESSA YAREMCHUK – CAROLINA BRUM MEDEIROS – WANDERLEY, *Small Dynamic Neural Networks for Gesture Classification with The Rulers (a Digital Musical Instrument)*, in *Proceedings of the 19th International Conference on New Interfaces for Musical Expression*, Baton Rouge 2015, pp. 150-155: 152.

sui modelli Genesis – in tempo reale durante la simulazione, e tutto deriva dal comportamento fisico dell'unico oggetto vibrante simulato.



Fig. 1.7 Dispositivo aptico TGR (da JAMES LEONARD – CLAUDE CADOZ, *Physical Modelling Concepts for a Collection of Multisensory Virtual Musical Instruments*, in *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression*, Baton Rouge 2015, p. 152).

Le più recenti soluzioni sviluppate in ACROE-ICA per la progettazione e l'implementazione di strumenti musicali virtuali multisensoriali sono confluite nella piattaforma *Modeleur-Simulateur pour la Création Instrumentale* (MSCI), il primo ambiente per la creazione e la manipolazione di strumenti virtuali multisensoriali, che permette il calcolo su larga scala di modelli fisici e l'interazione aptica sincrona ad alte prestazioni, mantenendo le qualità ergotiche dei gesti musicali in un contesto digitale. L'assemblaggio di queste funzionalità, andando dal nucleo stesso di questa situazione 'sovra-strumentale',¹¹⁰ con i dispositivi di force feedback, alla proiezione audio e video multi-spaziale, ha dato vita a quella che Cadoz e l'équipe di ACROE hanno denominato la piattaforma *Hélicanthe*,¹¹¹ una sorta di meta-strumento generale per la composizione

¹¹⁰ Cfr. CADOZ, *Supra-Instrumental Interactions and Gestures*, «Journal of New Music Research», XXXVIII (2009), pp. 215-230.

¹¹¹ Cfr. CADOZ, *La plateforme Hélicanthe : modélisation physique Cordis-anima temps reel – Genesis – 4^E generation*, «Journées d'Informatique Musicale 2020 – Préactes», 15 pp.

che permette di creare strumenti virtuali, di produrre nuove esperienze gestuali sia sonore sia visive e di vivere l'esperienza musicale in una dimensione spaziale immersiva:

Cet outil est une concrétisation opérationnelle intégrale du paradigme préconisé par l'ACROE situant la « *simulation multisensorielle et interactive des objets physiques* » (ou « *simulation multi sensori-motrice* ») au cœur des technologies pour la création musicale, visuelle et multisensorielle à l'aide du numérique. Ce paradigme s'est proposé en tant que généralisation de la création du son par modélisation du signal, alors que Mathews, Risset, ou Hiller, Issacson et d'autres avaient déjà interrogé les promesses de l'ordinateur comme outil universel pour créer la musique.¹¹²

Utilizzata per la prima volta in una performance pubblica dal vivo da Cadoz per il suo brano *Hélios*, la piattaforma Hélicanthe, interattiva in tempo reale, integra, quindi, in uno strumento completo per la creazione musicale e multisensoriale le cinque tecnologie fondamentali sviluppate da ACROE: oltre al formalismo Cordis-Anima, all'ambiente di modellizzazione Genesis, nella sua nuova versione G-IV, ai sistemi TGR per l'interazione gestuale con ritorno di forza e tastiere modulari retroattive, integrati nella piattaforma Telluris per la simulazione multisensoriale in tempo reale, viene dotata di una cupola sonora con 24 altoparlanti distribuiti su una semisfera di 10 m di diametro e due grandi schermi, e Mimesis, un ambiente software di modellizzazione fisica [fig. 1.8].

¹¹² CADOZ, *La plateforme Hélicanthe* cit., p. [1].

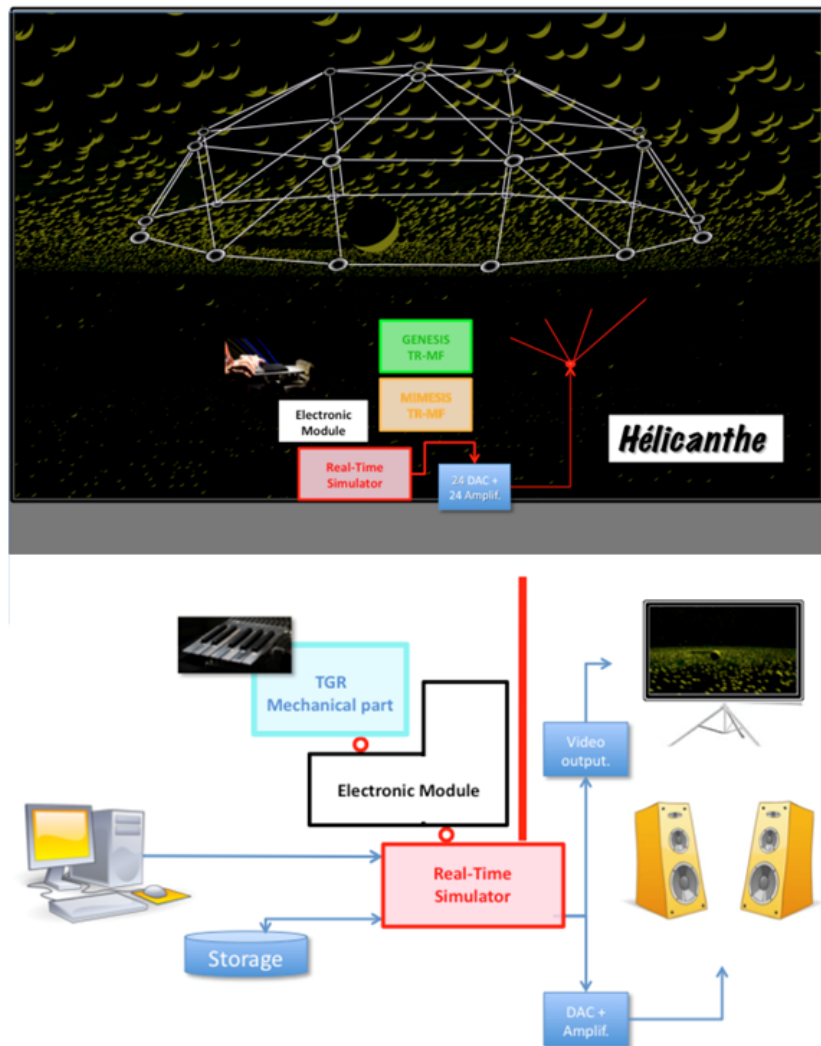


Fig. 1.8 Rappresentazione e schematizzazione della piattaforma Hélicanthe (da Claude Cadoz, La plateforme Hélicanthe: modélisation physique Cordis-Anima temps réel – Genesis – 4^a génération, in Journées d'Informatique Musicale 2020, préactes, p. [2]).

1.3.3 L'approccio modale

Alla fine degli anni Ottanta, Jean-Marie Adrien, dopo aver fatto esperienza con i metodi di sintesi tradizionali e di modellizzazione fisica, iniziò a studiare le applicazioni al campo della sintesi del suono della teoria dell'analisi modale, impiegata, fin dagli anni Cinquanta, nella vibroacustica industriale per modellizzare il comportamento vibratorio di elementi strutturali, sottoposti a forze esterne, quali macchinari, edifici, parti di aerei e altri mezzi di trasporto. Mediante l'applicazione della teoria modale, si è in grado di

prevedere, a partire dai modi di vibrazione fondamentali della struttura stessa, la modalità con cui una struttura reagirà a una data eccitazione esterna.¹¹³

La sintesi modale, come per il paradigma massa-molla, parte, dunque, dal presupposto di un'idea modulare della rappresentazione dell'oggetto sonoro, pensato non come un'unica struttura complessa, bensì come un insieme di sottostrutture in vibrazione che interagiscono tra di loro. Tali sottostrutture, il cui numero è assai ridotto rispetto al modello fisico massa-molla, possono tipicamente includere parti quali ponticelli e corpi di violino, tubi acustici, campane, membrane di tamburi, etc. Se, analogamente al paradigma massa-molla, l'approccio modale rappresenta la risposta delle sottostrutture ad una eccitazione applicata esternamente (forze, flussi d'aria, pressioni o movimenti), tipica dell'analisi modale è, invece, la descrizione di sottostrutture sottoposte a vibrazione, dalle quali si rivela un insieme di modi di vibrazione naturali:

The motion of a complicated system having many moving parts may always be regarded as compounded from simpler motions, called *modes*, all going on at once. No matter how complicated the system, we shall find that each one of its modes has properties very similar to those of a simple harmonic oscillator.¹¹⁴

Un modo di vibrazione è definito, quindi, come una *forma* particolare che la struttura assume quando è eccitata da una forza periodica a una certa frequenza e tutti i suoi punti risuonano a quella frequenza medesima. A differenza dell'analisi di frequenza, in cui il segnale è decomposto in serie di onde sinusoidali aventi ciascuna la propria frequenza e ampiezza, nell'analisi modale, la forma della vibrazione è decomposta in serie di forme modali aventi ciascuna la propria frequenza e proprietà di ampiezza di deflessione.¹¹⁵ Più precisamente, ogni modalità viene definita attraverso un insieme di *dati modali*, suddividibili in due gruppi: il primo concerne le caratteristiche di risposta in frequenza e i coefficienti di smorzamento delle sue modalità di risonanza, il secondo, le

¹¹³ Cfr. ADRIEN, *Simulation numerique de systemes vibrants complexes* cit.; ID., *The Missing Link: Modal Synthesis*, in *Representations of Musical Signals*, cit., pp. 269-297.

¹¹⁴ FRANCK S. CRAWFORD, *Waves*, McGraw-Hill, New York 1968, p. 9.

¹¹⁵ Cfr. FRANCISCO IOVINO – RICHARD DUDAS – RENÉ CAUSSÉ – NICOLAS MISDARIIS – RICHARD POLFREMAN, *Modalys: a Synthesizer for the Composer-Luthier-Performer*, in *Proceedings of the International Computer Music Conference (ICMC)*, Ann Arbor, Michigan, 1998, pp. 1-35.

coordinate che rappresentano la forma della modalità di vibrazione, ovvero i valori di deflessione per tutti i punti della struttura discretizzata.¹¹⁶ Pertanto, le equazioni che descrivono l'oggetto non rappresentano l'oggetto stesso, bensì il modo in cui è probabile che vibri, dato che la vibrazione totale istantanea di uno strumento è esprimibile come la somma dei contributi di tali modalità [fig. 1.9].

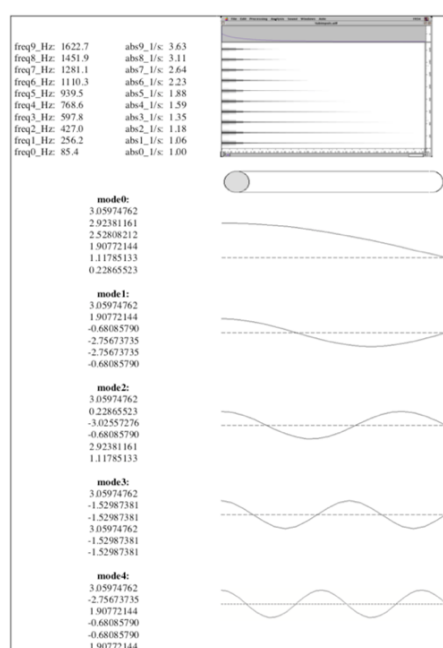


Fig. 1.9 Rappresentazione modale di un tubo acustico generato con Modalys. Le informazioni sulla frequenza e lo smorzamento sono illustrate tramite un sonogramma della risposta all'impulso del tubo [in alto a destra], e il movimento della colonna d'aria è rappresentato dalla distribuzione della pressione acustica lungo il tubo [sotto, a destra] (da FRANCISCO IOVINO – RICHARD DUDAS – RENÉ CAUSSÉ – NICOLAS MISDARIIS – RICHARD POLFREMAN, Modalys: a Synthesizer for the Composer-Luthier-Performer, in Proceedings of the International Computer Music Conference (ICMC), Ann Arbor, Michigan, USA, 1998, p. 7).

Dato che le frequenze di risonanza di un modo sono le componenti spettrali del suono prodotto quando si eccita la struttura con un impulso, la sintesi modale viene considerata un ibrido tra modelli fisici e modelli spettrali che costituisce un'alternativa al paradigma massa-molla. Pertanto, rispetto ai metodi di sintesi di modellizzazione fisica esistenti, la sintesi modale – direttamente legata alle caratteristiche uditive della struttura – offre il vantaggio di una rappresentazione indipendente dalle sue proprietà

¹¹⁶ Nel caso in cui le sottostrutture vibranti siano semplici, come, ad esempio, una corda non smorzata, i dati modali sono disponibili nella letteratura di ingegneria meccanica sotto forma di equazioni. Nel caso, invece, di strutture complesse, i dati vengono rilevati attraverso la sperimentazione su strumenti reali, come i trasduttori e i software di analisi disponibili per i ricercatori, dal momento che sono utilizzati in applicazioni industriali come la progettazione degli aeromobili. Cfr. INGOLF BORK, *Modal Analysis of Sound Fields of Musical Instruments*, Preprint 3243, presented at the 92nd Convention Audio Engineering Society, New York 1992.

spaziali, aspetto particolarmente utile perché nel passaggio continuo da uno strumento all'altro si riduce la transizione dei parametri modali.¹¹⁷ Tale peculiarità conferisce una maggiore flessibilità che permette ibridazioni timbriche risultanti dalla interscambiabilità delle sottostrutture, come sottolinea Roads:

The modal approach has an advantage of flexibility over the mass-spring paradigm. This derives from the modularity of the modal substructures. Modal synthesis partitions sound-producing mechanisms into vibrating substructures. It is possible to add or subtract substructures to create time-varying synthesis effects, such as “expanding” or “shrinking” the size of an instrument. The method also permits timbral interpolations from one instrument to another by combining substructures in an unnatural manner.¹¹⁸

In tal senso, il formalismo modale consente una descrizione uniforme di una grande varietà di sistemi meccanici o acustici (anche complessi), poiché fornisce un controllo diretto che deriva dalle proprietà frequenziali delle strutture stesse che consente, grazie alle sue caratteristiche modulari, la costruzione di qualsivoglia tipologia di strumenti. Tale approccio è, dunque, particolarmente adatto a simulare strutture ibride, in quanto la modellizzazione di un oggetto che produce suono può essere interpretata come un sistema di oggetti virtuali (come piatti, corde e tubi), collegati tra di loro da dati modali, che interagiscono e si alimentano reciprocamente di energia per indurre movimento nell'oggetto costruito.

La sintesi modale è stata implementata in software di sintesi sonora quali, tra gli altri, Mosaic e il suo successore Modalys, e Tassman, tutti ambienti modulari, che prevedono l'utilizzo di moduli riconfigurabili in qualsiasi momento, sebbene non permettano la composizione strutturale come, ad esempio, accade per i sistemi di interazione di massa.¹¹⁹ Se Modalys, (§ 1.3.3.1), ha costituito la prima implementazione

¹¹⁷ Cfr. OLIVIER CALVET - RONAN LAURENS - ADRIEN, *Modal Synthesis: Compilation of Mechanical Sub-Structures and Acoustical Sub-Systems*, in *Proceedings of the 1990 International Computer Music Conference*, San Francisco 1990 pp. 57-59; ADRIEN, *The Missing Link: Modal Synthesis*, in *Representations of Musical Signals* cit., pp. 269-297.

¹¹⁸ ROADS, *The Computer Music Tutorial* cit., p. 275.

¹¹⁹ Cfr. ILIA BISNOVATYI, *Flexible Software Framework for Modal Synthesis*, in *Proceedings of the Digital Audio Effects Conference*, Verona 2000, pp. 109-114; JOSEPH DERECK MORRISON – ADRIEN, *Mosaic: A Framework for Modal Synthesis*, «Computer Music Journal», XVII (1993), pp. 45-56; GERHARD ECKEL – IOVINO – CAUSSÉ, *Sound Synthesis by Physical Modelling with Modalys*, in *Proceedings of the International Symposium on Musical Acoustics*, Dourdan 1995. pp. 479-482.

della sintesi modale, successivamente è stato sviluppato Tassman, prodotto dal *Sound Synthesis Studio*, un'applicazione che include un sintetizzatore modulare in tempo reale – il quale può essere suonato utilizzando il protocollo MIDI o integrato come plug-in in un software host – basato su blocchi riconfigurabili di strutture risonanti ed eccitatori liberamente collegati [fig. 1.10]. Inoltre, questa applicazione combina i modelli fisici con altre strutture sonore e controller basati sull'approccio psicoacustico. I suoi moduli fisici, immersi in un ambiente di segnale, corrispondono a strutture vibranti o a strumenti predefiniti – ad esempio, corde, corde eccitate con l'arco, piatti etc. –, con un approccio che risulta essere assai meno modulare di Modalys, in quanto alcuni di questi moduli incorporano direttamente un meccanismo di eccitazione e una struttura vibrante.

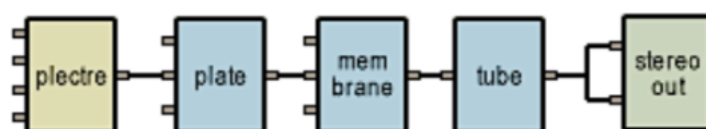


Fig. 1.10 Esempificazione di un semplice progetto di strumento ibrido in Tassman. I timbri risultanti dipendono dall'allineamento e dall'ordine delle parti costituenti colpire (da KOS, *Cyberactions and Cyberinstruments via Physical Modeling Synthesis: Extending Musical Realities*, p. 49).

Cook ha esteso l'idea della sintesi modale alla sintesi parametrica di suoni percussivi. Questo metodo, denominato *Physical Inspired Sonic Modelling* (PhISM), basato sull'analisi spettrale parametrica, associa un banco di risonatori a un segnale di eccitazione. Dall'analisi di diversi tipi di eccitazione è possibile, infatti, parametrizzare la posizione e il gesto percussivo, che può, poi, essere utilizzato per il controllo in tempo reale (§ 1.3.3.2). Più recentemente, diversi ricercatori, tra i quali Rudolf Rabenstein, hanno sviluppato un metodo correlato, chiamato *Functional Transformation Method* (FTM), che utilizza tecniche modali per la simulazione delle vibrazioni degli strumenti musicali. Tale metodo, dopo aver analizzato indipendentemente le parti di uno strumento musicale, non prevede l'approssimazione del suono risultante o delle caratteristiche vibrazionali misurate in punti discretizzati su strumenti reali, ma risolve direttamente la PDE (*Partial differential equation*) sottostante.¹²⁰ Procedimento, questo, vantaggioso poiché risolve i modelli fisici analiticamente, simulando in tal modo accurato

¹²⁰ Cfr. LUTZ TRAUTMANN – RUDOLF RABENSTEIN, *Digital Sound Synthesis by Physical Modeling using the Functional Transformation Method*, Kluwer Academic/Plenum Publishers, Boston 2003.

anche i segnali temporali e quindi i meccanismi di produzione del suono. Inoltre, con il FTM si possono trovare realizzazioni efficienti che permettono simulazioni in tempo reale di diverse strutture vibranti.¹²¹

1.3.3.1 Modalys: un sintetizzatore per il compositore-liutaio-performer

Modalys, fondato sulla implementazione della sintesi modale, è il risultato di anni di ricerca portati avanti da Adrien, a partire dal 1988, prima all'Università di Parigi VI¹²² e poi all'IRCAM nell'ambito del Musical Acoustics Team, con lo sviluppo di una serie di programmi Unix in C, che costituiscono Mosaic, la versione preliminare di Modalys¹²³. Nel 1990, il programma venne riscritto in C++ da Joseph Morrison al fine di renderlo operativo per la produzione musicale, dotandolo, come meccanismo di controllo, di un'interfaccia utente interattiva basata su testo nel linguaggio di programmazione *Scheme* di Oliver Laumann (un dialetto di Lisp). Nella nuova versione, il programma forniva una realizzazione particolarmente efficace della sintesi modale, pur presentandosi come un software toolkit modulare, che consentiva di essere agevolmente utilizzato dai musicisti informatici: un ambiente aperto in cui gli strumenti acustici virtuali potevano essere immaginati, eseguiti e manipolati.

Il cuore di Modalys è un motore di sintesi usato per creare strumenti virtuali usando un certo numero di sottostrutture già precostituite – quali corde, colonne d'aria, piastre metalliche e membrane – a cui si aggiungono sottostrutture per la simulazione di azioni quali il colpire, il pizzicare, il suonare con l'archetto etc., che forniscono il mezzo per la personalizzazione da parte dell'utente dei parametri che guidano l'interazione, come la pressione, la velocità etc.¹²⁴ Le combinazioni possono essere arbitrariamente complesse, permettendo di assemblare modelli sofisticati. Gli oggetti e le interazioni

¹²¹ Applicazioni di sintesi sonora di FTM sono in fase di sviluppo. Un punto di vista interessante sulla relazione tra i metodi nel dominio del tempo e della frequenza è fornito da DAVIDE ROCCHESSE, *The Ball within the Box: A Sound Processing Metaphor*, «Computer Music Journal», XIX (1995), pp. 47-57.

¹²² Cfr. ADRIEN, *Simulation numérique de systèmes vibrants complexes* cit.

¹²³ Cfr. in part. MORRISON – ADRIEN, *Control Mechanisms in the Mosaic Synthesis Program*, in *Proceedings of the 1991 International Computer Music Conference*, San Francisco 1991, pp. 19-22; MORRISON – ADRIEN, *Mosaic: a Frame-work for Modal Synthesis* cit.

¹²⁴ Cfr. ROADS, *The Computer Music Tutorial* cit., p. 276.

sono specificati usando parametri fisici (ad esempio la lunghezza, il raggio, la forza e la distanza relativa) e, conseguentemente, non è richiesta agli utenti una conoscenza dettagliata dei concetti e delle tecniche di DSP.

Gli elementi di Modalys a cui l'utente fa riferimento sono essenzialmente di quattro tipi: gli *oggetti* (1), definiti attraverso le loro proprietà fisiche (geometria, dimensioni, materiale) e rappresentati internamente attraverso i loro dati modali; l'*accesso* (2), un punto in una posizione ben definita su un oggetto, utile al software per inviare energia all'oggetto stesso e/o per misurare i suoi dati vibrazionali; la *connessione* (3), un collegamento tra due oggetti che definisce le modalità della loro interazione;¹²⁵ il *controller* (4), un generatore di valori che descrive, in ogni dato momento, l'evoluzione di un qualche parametro, la cui rilevanza musicale scaturisce dal fatto che il suo valore istantaneo può essere mappato su una variabile esterna di connessione per definire una performance sullo strumento.

Per creare uno strumento virtuale, l'utente procede, quindi, selezionando gli oggetti di base (per esempio tubo, corda, membrana, piastra, plettro, arco, martello, etc.), poi prosegue specificando gli accessi agli oggetti, cioè le posizioni su cui avvengono le interazioni, aggiungendo, infine, le connessioni che permettono di creare interazioni tra gli oggetti, corrispondenti agli stili di suono: *strike*, *pluck*, *blow*, *bow*, etc. Lo strumento, così definito, viene poi 'eseguito' associando i controller ai dati esterni di connessione dello strumento stesso. Il livello di astrazione dell'approccio modale è superiore ad altri metodi, come, ad esempio, quello di interazione di massa, poiché gli elementi costitutivi della sintesi modale sono strutture vibratorie pre-costituite, con una modellizzazione a livello di oggetti su scala 'umana' [Fig. 1.11].¹²⁶

¹²⁵ La connessione consiste in due *accessi* (un accesso per oggetto): l'interazione e un insieme di variabili esterne. L'interazione è un mezzo attraverso il quale due oggetti possono scambiarsi energia, mentre le variabili esterne sono gli agenti che comunicano con il 'mondo esterno'. Più precisamente, un gesto di performance può essere definito dall'istanza delle variabili esterne di una connessione, che controllano il gesto che ecciterà e metterà in vibrazione lo strumento.

¹²⁶ Cfr. EDUARDO RECK MIRANDA, *Computer Sound Design: Synthesis Techniques and Programming*, Focal Press, Oxford 2002.

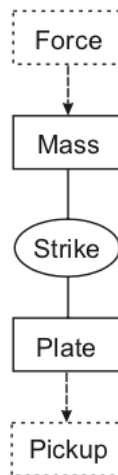


Fig. 1.11 Rappresentazione di strutture vibratorie prefabbricate che costituiscono i blocchi di costruzione della sintesi modale (EDUARDO RECK MIRANDA, *Computer Sound Design: Synthesis Techniques and Programming*, p. 98).

Tuttavia, negli anni immediatamente successivi, Modalys non fu usato intensamente in brani musicali a causa delle limitate capacità di calcolo dei computer dell'epoca, ed anche perché, in alcune situazioni, come ad esempio il collegamento di ane e archi ai risuonatori, risultava difficile impostare i valori di controllo dello strumento in modo efficiente, come pure le caratteristiche spettrali del suono reale. Nel 1994, fu sviluppata una nuova versione di Modalys da Gerhard Eckel e, dal 1996, da Francisco Iovino, i quali coordinarono nuovi sviluppi del progetto, anche grazie al supporto scientifico di René Caussé e dell'IRCAM Acoustics Team. Nel 1995, Modalys fu portato su Macintosh, versione disponibile attraverso l'IRCAM Forum, e, nel '99, su JMax per la realizzazione in tempo reale.¹²⁷

A partire dallo stesso anno, Polfreman in collaborazione con l'IRCAM, sviluppa *Modalys-ER*¹²⁸, un ambiente relativamente semplice da usare per progettare e controllare la sintesi sonora di modelli fisici mediante un'interfaccia grafica, che fornisce un'organizzazione di alto livello. Infatti, poiché l'interfaccia di Modalys utilizzava l'interprete Scheme, l'utente, per creare oggetti e stabilire le loro connessioni, doveva necessariamente scrivere una serie di istruzioni, aspetto che rendeva l'uso di Modalys di

¹²⁷ Cfr. ECKEL – IOVINO, – CAUSSÉ, *Sound Synthesis by Physical Modelling with Modalys* cit.

¹²⁸ Modalys-ER fu anche portato su OpenMusic, con la libreria MfOM, che permetteva un livello di controllo superiore, dato che gli strumenti (sistemi fisici) erano definiti sotto forma di classi, dotate di un editor grafico. Le istanze create erano poi interpretate e trasmesse al sintetizzatore. Questa libreria non è stata più mantenuta nelle ultime versioni di OpenMusic. Cfr. JEAN BRESSON, *La synthèse sonore en composition musicale assistée par ordinateur : modélisation et écriture du son. Modélisation et simulation*, PhD. thesis, Université Pierre et Marie Curie – Paris VI, 2007.

non facile utilizzazione in un contesto musicale, vista la scarsità di struttura predefinita al di sopra del livello di interazione con gli oggetti, sebbene, con l'uso di tecniche di programmazione orientata agli oggetti, le entità di livello superiore possano essere definite e manipolate. Inoltre, pur essendoci una serie di vantaggi per gli utenti in termini di analogia acustica con sonorità familiari, di flessibilità nel design dello strumento e nell'uso di una terminologia fisica, la questione del controllo rimaneva difficile, poiché, ad esempio, «which precise values of force, speed, or breath pressure (for example) should be used in a given context is not obvious, and this is exacerbated by the non-real time nature of the synthesis, making exploration of alternative parameter values a drawn out process».¹²⁹

Una sintesi in Modalys-ER è specificata usando uno strumento e una partitura: una divisione volutamente familiare che separa una specifica di sintesi centrale, da un insieme di parametri variabili nel tempo applicati al momento della sintesi. Il paradigma grafico con cui Modalys-ER rappresenta uno strumento è la patch, nella quale quest'ultimo è 'visto' come un grafico di caselle di oggetti collegati da caselle di connessione. Il ruolo dell'esecutore è designato come *interprete* di una partitura: un insieme di funzioni di inviluppo, che devono essere associate ai dati di connessione dello strumento tramite le tecniche. Tali tecniche definiscono le mappature di un insieme standardizzato di parametri della partitura (classificati in pitch, eccitazione e tipi di timbro) sui controlli dinamici all'interno dello strumento, con mappature *one-to-many* possibili. Così, un parametro in una partitura attiva una tecnica che cambierà i valori di controllo nello strumento per creare una performance (come muovere un plettro per pizzicare una corda, ad esempio): non c'è limite al numero di controller che una tecnica può influenzare; quindi, possono essere prodotti cambiamenti potenzialmente complessi in uno strumento come risposta a semplici mutamenti di un singolo parametro della partitura.¹³⁰

Con Modalys-ER viene, dunque, a crearsi un assetto a quattro livelli: partitura - esecutore - tecnica - strumento. Tale assetto può essere considerato come un'astrazione vantaggiosa di tutti i parametri che possono essere cambiati nel tempo della sintesi in

¹²⁹ POLFREMAN, *MfOM: a Library for Building and Controlling Physical Model Instruments in OpenMusic*, in *International Computer Music Conference Proceedings 2002*, pp. 436-439: 437.

¹³⁰ *Ibidem*.

un'area separata, lasciando la configurazione centrale statica: il compositore può quindi lavorare con l'evoluzione dei valori di controllo, tralasciando molti dei dettagli interni al processo di sintesi.

Nei decenni successivi, con l'aumento della velocità dei processori, Modalys è stato esteso e arricchito di interfacce che hanno consentito di utilizzarlo in diversi ambienti, quali Lisp, Max/MSP, Open Music (OM) e MatLab. Attualmente, Modalys può essere invocato da ModaLisp, in origine denominato Modalys (LispWorks). L'Interfaccia Lisp basata su testo è il successore dell'interfaccia Scheme originale, che utilizza il linguaggio di programmazione Lisp.

Modalys for Max, scelto da molti compositori e/o sound designer, è Modalys incarnato nell'ambiente Max/MSP in tempo reale, ed è usato per costruire graficamente strumenti sofisticati, costituiti da corde, piastre, membrane e tubi di qualsiasi tipo di materiale (metallo, legno, gomma, vetro, etc.), di dimensioni e di interazioni. Questa interfaccia permette di eseguire uno strumento Modalys in tempo reale usando l'oggetto Modalys~object e altri oggetti di costruzione (mlys.*). Generalmente, i file Mlys usano controller dinamici invece di controller di inviluppo, così la sintesi può essere controllata da messaggi Max in tempo reale, sfruttando le capacità di elaborazione dei messaggi in tempo reale di Max/MSP. La *Modalys Library for OpenMusic* permette di usare l'ambiente OM di IRCAM per progettare e sintetizzare strumenti Modalys. Poiché OM è basato su Lisp, è possibile interagire con Modalys in modo analogo all'interfaccia ModaLisp, anche se in modalità grafica, usando, nel contempo, i potenti strumenti di composizione assistita dal computer di OM per il controllo della sintesi. Infine, l'interfaccia MATLAB per Modalys è un insieme di oggetti MATLAB che permette di scrivere script Modalys all'interno di MATLAB, un ambiente di calcolo numerico, che si rivela particolarmente utile per quei ricercatori che vogliono avere accesso al motore Modalys direttamente nel proprio ambiente di programmazione, per applicazioni scientifiche.¹³¹

¹³¹ RICHARD DUDAS – ROBERT PIECHAUD, *Modalys Documentation v. 3.5.0*, in <<https://support.ircam.fr/docs/Modalys/current/co/Introduction.html>> (accesso 10-08-2021).

1.3.3.2 Physically Informed Stochastic Models (PhISM)

Nel 1996, Perry Cook in *Physically Informed Sonic Modeling (PhISM): Percussive Synthesis*¹³² descrive un nuovo metodo per l'analisi/sintesi di suoni percussivi, applicando i principi della modellizzazione fisica ai risultati di tecniche di sintesi parametriche come la sintesi modale, quella sinusoidale e quella granulare. L'enfasi è posta sull'uso della modellizzazione fisica al fine di garantire il controllo espressivo di efficienti modelli di sintesi. L'obiettivo principale consiste nel fornire una sintesi espressiva, con parametri di controllo significativi, simili a quelli che un percussionista userebbe per creare un'espressione articolata e fine con uno strumento reale. Obiettivi secondari del metodo sono l'efficienza degli algoritmi e la capacità del sistema di comportarsi come una tradizionale tecnica di analisi/sintesi. Come Cook esplicita,

The term 'physically informed' implies that the instrument physics are taken into account in selecting the model, in deriving parameters for the selected model, and possibly in modifying certain synthesis parameter values in real time to allow expressive control of the sound.¹³³

Gli algoritmi di sintesi della famiglia PhISM modellizzano le tradizionali tipologie di strumenti a percussione ad altezza indeterminata e determinata. Di conseguenza, PhISM consiste di due diverse specie di algoritmi di sintesi chiamati *Physical Informed Spectral Additive Modeling* (PhISAM), che modellizza i sistemi con distinti comportamenti oscillatori modali e *Physical Informed Stochastic Event Modeling* (PhISEM), che modellizza i sistemi in cui il suono è prodotto dalla collisione casuale di molti oggetti.

Il primo algoritmo (PhISAM), implementato utilizzando la sintesi modale (filtri risonanti), è adatto per campane, percussioni a barra e altri strumenti simili, caratterizzati da comportamenti risonanti esponenzialmente decadenti. Il secondo algoritmo (PhISEM) è basato su sovrapposizioni pseudo casuali e sull'aggiunta di piccoli grani di suono in base a regole e parametri fisici predeterminati:

¹³² PERRY R. COOK, *Physically Informed Sonic Modeling (PhISM): Percussive Synthesis*, in *Proceedings of the International Computer Music Conference (ICMC 1996)*, Hong Kong 1996, pp. 228-231, ripubblicato in forma ampliata in ID., *Physically Informed Sonic Modeling (PhISM): Synthesis of Percussive Sounds*, «Computer Music Journal», XXI (1997), pp. 38-49.

¹³³ *Ivi*, p. 39.

PhISEM (physically informed stochastic event modeling) is a PhISM algorithm based on particle models. In PhISEM, models of particles in containers were solved numerically using the basic Newtonian equations of motion. Simulations with varying numbers of particles and damping (loss of energy when particles collide with each other or the container) were run and statistics were collected about the likelihood of a sound-producing collision, the overall decay in sound energy, etc. Sound is produced only by particles hitting the container shell, because collisions between particles do not couple efficiently to the radiated sound. The resulting PhISEM synthesis algorithm reduces the behavior of particle systems to a statistical process in which parameters relate directly to the parameters collected in the direct simulations.¹³⁴

PhISEM riduce il comportamento dei sistemi di particelle ad un processo statistico i cui parametri si riferiscono direttamente a quelli raccolti nelle simulazioni. Gli eventi che producono suono sono modellizzati come brevi esplosioni di rumore bianco a decadimento esponenziale, e le risonanze del sistema sono modellizzate utilizzando semplici filtri di risonanza. L'algoritmo modella efficacemente gli strumenti percussivi con un maggior numero di risonanze, come tamburelli e campanelli da slitta. Le singole parziali sono modellizzate con filtri digitali, le cui frequenze di risonanza sono sostituite da un'altra frequenza, che si trova in prossimità casuale alla risonanza principale, ogni volta che si verifica una collisione.

Anche se originariamente i modelli implementati riguardavano particelle in movimento all'interno di sfere, il modello PhISEM si estende bene a qualsiasi sistema con molteplici oggetti sonori semi-casuali indipendenti, che producono suono quali maracas, tamburelli, campanellini, monete in tasca, carillon del vento, ma anche passi sulla ghiaia, sull'erba e sulla neve:

Simulations with varying numbers of particles and damping (energy loss when particles collide with each other and the container) were run, and statistics were collected about

¹³⁴ STEPHEN LAKATOS – COOK – SCAVONE, *Selective Attention to the Parameters of a Physically Informed Sonic Model*, «Journal of the Acoustical Society of America», CVII (2000), *Acoustic Research Letter Online* 2000, pp. 31-36: 32.

the likelihood of sound-producing collisions, the overall decay in sound energy, and other properties of the simulated system.¹³⁵

1.3.4 L'approccio per guida d'onda

Agli inizi degli anni Ottanta, Julius O. Smith III avviò un nuovo approccio alla modellizzazione fisica basato sul principio della propagazione delle onde sonore sui diversi mezzi, una tecnica già da tempo utilizzata dai fisici per descrivere il comportamento delle onde in spazi risonanti, simulando ambienti di riverberazione anche impossibili da sperimentare.¹³⁶

Nella *Digital Waveguid Synthesis*, termine coniato da Smith stesso, una guida d'onda (o filtro per guida d'onda) è un modello computazionale del mezzo attraverso cui si propaga l'onda. Tipici esempi di guide d'onda sono le corde e i tubi degli strumenti a fiato: l'idea è quella di simulare il percorso dell'onda sonora attraverso il corpo risonante, in modo da ricostruire l'intero sistema di produzione del suono:

On the other hand, distributed model implementations typically consist of delay lines (often called "digital waveguides" when used for physical modeling), in combination with digital filters and nonlinear elements. They model wave propagation in distributed media such as strings, bores, horns, plates, and acoustic spaces. In digital waveguide models, distributed losses and dispersion are still summarized and lumped at discrete points as digital filters, separating out the pure delay-line which represents ideal propagation delay. Distributed waveguide models can be freely combined with lumped filter models; for example, a brass instrument model typically consists of a lumped model for the "lip reed" and a distributed waveguide model for the horn.¹³⁷

Per l'elaborazione del nuovo formalismo, si rivelarono determinanti i primi anni Ottanta, che coincidono col periodo di avvio dei primi studi di modellizzazione della corda, da

¹³⁵ COOK — LAKATOS, *Using Dsp-Based Parametric Physical Synthesis Models to Study Human Sound Perception*, in *Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics*, IEEE, New Paltz, NY 2003, s.n.p [4 pp.], p. [2].

¹³⁶ ROADS, *The Computer Music Tutorial* cit., p. 282.

¹³⁷ JULIUS O. SMITH III, *Physical Modeling Synthesis Update*, «Computer Music Journal», XX (1996), pp. 1-16: 2.

parte di Smith, poi presentati al ICMC di San Francisco nel 1982,¹³⁸ così come di altre fondamentali ricerche sulla modellizzazione con cui l'autore venne in vari modi in contatto e che influirono nelle sue future ricerche, quali, in particolare, gli studi di McIntyre e Woodhouse,¹³⁹ dalla cui descrizione della dinamica delle corde egli trasse un migliore meccanismo dell'arco, e l'algoritmo sviluppato da Kevin Karplus e Alex Strong,¹⁴⁰ in seguito esteso e reinterpretato, con la modellizzazione per guida d'onda, dallo stesso Smith.

Motivati in parte dalle difficoltà nell'applicazione dei metodi del dominio della frequenza ai sistemi che presentano forti non linearità, Michael McIntyre, Robert Schumacher e Jim Woodhouse, fin dalla fine degli anni Settanta, avevano studiato in dettaglio il comportamento dei suoni nel dominio del tempo, analizzando la nascita e l'evoluzione delle forme d'onda e dei meccanismi fisici alla base di questi fenomeni. In *On the Oscillation of Musical Instruments*,¹⁴¹ essi descrissero, in termini di elementi lineari e elementi non lineari accoppiati, un modello generalizzato per oscillatori auto-sostenuti – cosiddetti in quanto il suono viene prodotto fintanto che l'energia viene fornita al sistema –, quali violino, clarinetto e flauto:

In all three of these cases (woodwinds, bowed strings, and pipes), the excitation is a nonlinear switching mechanism that sends a sharp impulse wave into the linear part of the instrument. The linear part acts like a filter to round the waveform into the characteristic timbre of the instrument.¹⁴²

La sintesi di McIntyre, Schumacher e Woodhouse (MSW) modellizzava gli oggetti e le azioni come un insieme compatto di equazioni: le equazioni più complesse e specifiche degli strumenti descrivono l'*eccitazione* – le cui variabili principali sono la fonte di energia, l'energia fluttuante dell'elemento lineare – e la *funzione di riflessione* che

¹³⁸ SMITH III, *Synthesis of Bowed Strings*, in *Proceedings of the International Computer Music Conference*, San Francisco 1982, pp. 308-340; ID., *Techniques for Digital Filter Design and System Identification with Application to the Violin*, Ph.D. thesis, Stanford University 1983.

¹³⁹ MICHAEL MCINTYRE – JIM WOODHOUSE, *On the Fundamentals of Bowed String Dynamics*, «Acta Acustica united with Acustica», XXXIII (1979), pp. 93-108.

¹⁴⁰ KEVIN KARPLUS – ALEX STRONG, *Digital Synthesis of Plucked String and Drum Timbres*, «Computer Music Journal», VII (1983), pp. 43-55.

¹⁴¹ MICHAEL E. MCINTYRE – ROBERT T. SCHUMACHER – JAMES WOODHOUSE, *On the Oscillation of the Musical Instruments*, «Journal of the Acoustic Society of America», LXXIV (1983), pp. 1325-1345.

¹⁴² ROADS, *The Computer Music Tutorial* cit., p. 281.

descrive il filtraggio della forma d'onda effettuato dalla parte lineare del sistema. Le equazioni per la parte non lineare e lineare sono valutate simultaneamente.¹⁴³ [Fig. 1.12].

Contrariamente ad altri metodi, allora predominanti, nel dominio della frequenza, l'approccio di MSW si colloca nel dominio del tempo, dando conto delle ragioni fisiche delle variazioni della forma d'onda, che consentono la rappresentazione di fenomeni quali l'appiattimento dell'altezza nelle corde ad arco, i subarmonici, e la durata del transitorio attacco, elementi tutti che costituivano un vantaggio importante per il controllo dei parametri collegati a quelli utilizzati dagli esecutori, sebbene il suono prodotto dal modello *MSW* puro, a causa delle sue numerose semplificazioni, non risultasse molto realistico, poiché, per elaborare modelli credibili di suoni di strumenti reali, è richiesta una grande raffinatezza di dettagli. In seguito, Smith e Douglas H. Keefe descriveranno delle implementazioni più efficienti del modello *MSW*, sostituendo con una *table lookup* e moltiplicazioni la soluzione simultanea delle equazioni per ciascun punto di campionamento, ben più pesanti dal punto di vista computazionale.¹⁴⁴

¹⁴³ Cfr. MCINTYRE - SCHUMACHER - WOODHOUSE, *On the Oscillation of the Musical Instruments* cit., p. 1327.

¹⁴⁴ Keefe, ad esempio implementò un sottoprogramma dettagliato per la specifica di colonne d'aria come estensione della sintesi *MSW* per ottoni, cfr. DOUGLAS H. KEEFE, *Physical Modeling of Wind Instruments* «Computer Music Journal», XVI (1992), pp. 57-73.

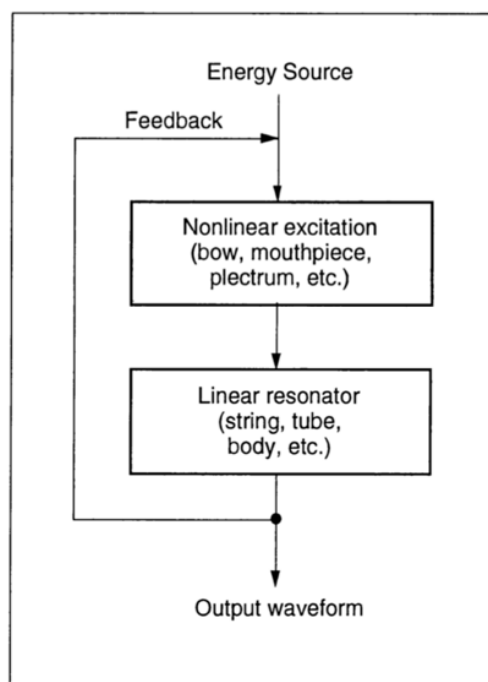


Fig. 1.13 Modello di oscillazione strumentale in MSW: eccitazione non lineare e risonanza lineare (da ROADS, *The Computer Music Tutorial*, p. 280).

Negli stessi anni, Smith era entrato anche in contatto con la ricerca di Karplus e Strong, due studiosi di informatica di Stanford, già citati, che avevano sviluppato un algoritmo per simulare i suoni prodotti dalle corde pizzicate e dalle percussioni (algoritmo Karplus-Strong, KS), basandosi sulla semplice scansione di una tabella, contenente inizialmente valori casuali, letta ciclicamente in modo simile a quello utilizzato per l'oscillatore digitale. Tale procedura implementava un filtro passa-basso operato sul contenuto della tabella, che si trasformava rapidamente da rumore bianco a onda periodica. L'effetto acustico di una corda pizzicata derivava, infatti, dal fatto che le componenti più alte dello spettro, dovute al rumore bianco, venivano, in tal modo, progressivamente e velocemente attenuate.¹⁴⁶

Per lo sviluppo dell'algoritmo, fu determinante l'incontro tra i due studiosi e il compositore David A. Jaffe, arrivato al CCRMA in quegli stessi anni, che, su proposta dello

¹⁴⁶ Pertanto l'algoritmo KS non produce un segnale d'uscita puramente ripetitivo, come la sintesi di base della *Wavetable*. In particolare, quelle componenti di frequenza del segnale random, che coincidono con le risonanze del filtro a pettine, si attenueranno più lentamente rispetto alle altre componenti. Così, il segnale nella linea di ritardo si trasforma in un segnale pseudo-periodico con una frequenza fondamentale chiaramente percepibile, sebbene non potesse essere accuratamente controllata. Cfr. ROADS, *The Computer Music Tutorial* cit., p. 293.

stesso Strong, sperimentò l'algoritmo KS per le corde pizzicate, nella sua composizione *May all You Children Be Acrobats* (1981) per mezzosoprano, otto chitarre e nastro generato dal computer. Favorevolmente impressionato dai risultati conseguiti, Jaffe iniziò a lavorare a *Silicon Valley Breakdown* (1982) estendendo l'algoritmo Karplus-Strong insieme a Smith III, il quale si rese conto che tale algoritmo poteva essere interpretato come un modello fisico estremamente semplificato di una corda pizzicata, un'equivalenza strutturale che, in seguito, gli consentì di derivare l'algoritmo KS come un caso speciale di un modello di corda per guida d'onda digitale, usato per modellizzare le onde acustiche in corde, tubi e membrane, come puntualizza, lo stesso Smith:

Having studied the McIntyre-Woodhouse papers, the author recognized the filtered-delay-loop in the Karplus-Strong algorithm as having the same transfer function as that of an idealized vibrating string. This equivalence later led to deriving the Karplus-Strong algorithm as a special case of a digital waveguide string model. When viewed as a digital waveguide model, the musical quality and expressivity of the EKS algorithm suggested (ca. 1985) that extremely simplified traveling-wave models with sparsely lumped losses and dispersion could capture the necessary dimensions of musical expressivity at very low computational cost.¹⁴⁷

La prima serie di estensioni e generalizzazioni dell'algoritmo KS, tipicamente conosciuto come algoritmo *Extended Karplus-Strong* (EKS), fu presentata nel 1982 alla Conferenza Internazionale di Computer Music (ICMC) di Venezia e pubblicata più dettagliatamente nel 1983 nel *Computer Music Journal*.¹⁴⁸ In tale lavoro, Smith e Jaffe propongono un'estensione delle modalità operative dell'algoritmo: al fine di ottenere risoluzioni frequenziali più raffinate, l'algoritmo venne esteso aggiungendo filtri all-pass al loop e migliorando i filtri proposti da Karplus e Strong.¹⁴⁹

¹⁴⁷ Cfr: SMITH III, *Physical Audio Signal Processing for Virtual Musical Instruments and Audio Effects*, 2010, in <https://www.dsprelated.com/freebooks/pasp/digital_waveguide_models_i.html> (accesso 10-7-2021).

¹⁴⁸ SMITH III, *Synthesis of Bowed Strings*, in *International Computer Music Conference Proceedings 1982*, pp. 308-340; DAVID A. JAFFE – SMITH III, *Extensions of the Karplus-Strong Plucked String Algorithm*, «Computer Music Journal», VII (1983), pp. 56-69.

¹⁴⁹ I loro perfezionamenti includevano il miglioramento dell'intonazione, un migliore controllo del tempo e del volume del decadimento del suono, la modellizzazione spettrale del suono iniziale "pizzicato", la variazione del volume sonoro in relazione alla larghezza di banda, la variazione del carattere e il numero di attacchi, i glissando e le legature, la simulazione delle vibrazioni delle corde per simpatia, e, infine, la

Smith, in continuità con la simulazione di MSW e con l'estensione dell'algoritmo KS, da lui reinterpretato 'fisicamente' per la sintesi di suoni di corde pizzicate, applicò – per la prima volta nel 1985-86, per poi perfezionarla nel 1992 – la teoria della modellizzazione per guida d'onda al fine di simulare le onde acustiche in corde, tubi e membrane.¹⁵⁰ Grazie alla compattezza e all'efficienza computazionale dell'algoritmo, la tecnica delle guide d'onda divenne in poco tempo il metodo più comunemente usato per la simulazione di strumenti musicali, aprendo la strada a una serie di nuove applicazioni tecnologiche dell'approccio fisico sia nella comunità accademica, sia in ambito commerciale (attraverso alcune serie di sintetizzatori prodotti da Yamaha e Korg).¹⁵¹

In uno strumento reale, una guida d'onda è il mezzo lungo il quale viaggiano le onde, come il tubo di uno strumento a fiato o la corda di uno strumento ad arco. Lo scopo della modellizzazione per guide d'onda consiste nel progettare un modello a tempo discreto che si comporti come un sistema fisico, costituito essenzialmente da un *eccitatore* e da un *risonatore*: il primo è la fonte di energia applicata allo strumento (come un arco che interagisce con una corda o l'aria che scorre all'interno di un flauto), il secondo è l'oggetto che è stato eccitato, come una corda accoppiata con il corpo di uno strumento o il tubo di un flauto. L'elemento base delle guide d'onda è, dunque, una coppia di linee di ritardo digitali che scorrono in direzioni opposte attraverso il mezzo di risonanza, al fine di descrivere il comportamento delle onde sonore a seguito di una iniziale eccitazione: una linea di ritardo è, infatti, un buon modello di questo processo dato che il fronte d'onda ha bisogno di un tempo finito per percorrere la lunghezza di un mezzo risonante, come di seguito specificato:

More recently developed digital waveguide methods follow a different path to the physical model the wave equation is first solved in a general way to obtain traveling waves

simulazione di una corda rigida e di un plettro vibrante. Cfr. ROADS, *The Computer Music Tutorial* cit., p. 292.

¹⁵⁰ SMITH III, *Efficient Simulation of the Reed-bore and Bow-string Mechanisms*, in *Proceedings of the 1986 International Computer Music Conference*, The Hague 1986, pp. 275-280; SMITH III, *Physical Modeling Using Digital Waveguides*, «Computer Music Journal», XVI (1992), pp. 74-91.

¹⁵¹ Cfr. in part. SMITH III, *Musical Applications of Digital Waveguides*, in *Technical Report STAN-M-39*, Stanford University Department of Music, Stanford 1987; ID., *Physical Modeling Using Digital Waveguides* cit., pp. 74-91; ID., *Efficient Synthesis of Stringed Musical Instruments*, in *Proceedings of the 1993 International Computer Music Conference*, San Francisco 1993, pp. 64-71; SMITH III, *Acoustic Modeling Using Digital Waveguide* in *Musical Signal Processing*, edited by Curtis Roads, Stephen Travis Pope, Aldo Piccialli, Giovanni De Poli, Routledge, New York 1997, pp. 221-263.

in the medium interior. The traveling waves are explicitly simulated in the waveguide model in contrast to computing a physical variable. The traveling waves must be summed together to produce a physical output. In the lossless case a traveling wave between two points in the medium can be simulated using nothing but a digital delay line. In the general linear case in which there are frequency dependent losses and dispersion the commutativity of linear time invariant systems allows the losses and dispersion to be lumped at discrete points such that most of the simulation still consists multiply free delay lines. This is essentially why computational costs are so low in waveguide synthesis algorithms.¹⁵²

Se, dunque, la risoluzione dell'equazione d'onda con i metodi tradizionali considera principalmente un mezzo ideale, ovvero senza perdite, il metodo delle guide d'onda si rivela invece un'efficiente descrizione dell'onde viaggianti lungo il mezzo risonante che tiene conto delle dispersioni o dei trasferimenti di energia (la colonna d'aria di un clarinetto o il dito sulla corda, o il ponte di uno strumento ad arco), o, ancora, della riflessione d'energia che si propaga in direzione opposta, simulata attraverso un'altra linea di ritardo, che dà seguito a una operazione di filtraggio, esaltando o attenuando certe frequenze in relazione al tempo del ritardo. Infine, oltre a tali elementi, definiti *scattering junctions* (giunzioni di dispersione), viene dettagliatamente descritta, attraverso un doppio percorso possibile, anche l'energia dispersa: l'uscita diretta, o indiretta con una parte dell'energia che rientra nel percorso del mezzo, simulando con un filtraggio le caratteristiche del risonatore prima di produrre il segnale in uscita. In generale, una modellizzazione per guide d'onda viene costituita da soli quattro blocchi di costruzione: eccitazione, linee di ritardo, giunzioni di dispersione e filtri [Fig. 1.13].

¹⁵² SMITH III, *Physical Modeling Using Digital Waveguides* cit., p. 1.

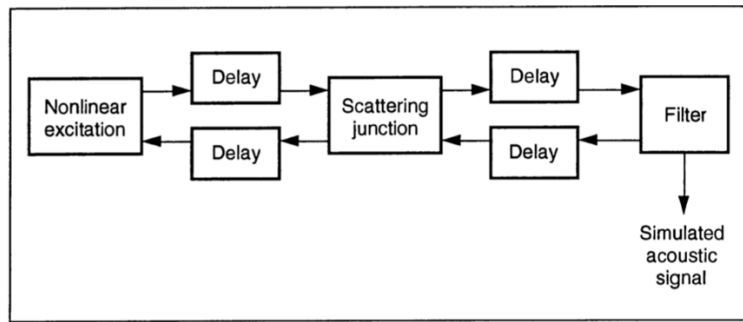


Fig. 1.13 Modello generico di uno strumento a guida d'onda che simula strumenti a corda o a fiato (da ROADS, The Computer Music Tutorial, p. 283).

Poiché modellizzano la propagazione dell'onda piuttosto che la materia in sé, le guide d'onda digitali offrono un maggiore livello di precisione nella modellizzazione di oggetti vibranti, *in primis*, la modellizzazione di oggetti oscillanti lineari, mentre il livello di precisione risulta minore nella descrizione dei risonatori non lineari o negli oggetti in movimento e nei solidi. Così, già a partire dal 1985-86, il paradigma di modellizzazione della guida d'onda digitale venne implementato come un 'kit di costruzione' per prototipi di riverberatori *loss/less* che supportano topologie di feedback generali,¹⁵³ mentre l'anno successivo i blocchi di costruzione furono estesi alle corde vibranti e ai tubi acustici monocilindrici (principalmente per la famiglia del clarinetto).¹⁵⁴ Nel tempo, pur essendo le guide d'onda monodimensionali particolarmente adatte per una efficiente modellizzazione di sistemi con spettri quasi-armonici, come corde vibranti o colonne d'aria, sono stati sviluppati modelli computazionali di strutture multidimensionali 2D e volumi 3D con reti digitali a guida d'onda, cosiddette *digital waveguide mesh*, altamente efficienti per la simulazione di campane e piatti e altri oggetti inusuali.¹⁵⁵

¹⁵³ SMITH III, *A New Approach to Digital Reverberation Using Closed Waveguide Networks*, in *Proceedings of the 1985 International Computer Music Conference*, Vancouver 1985, pp. 47-53.

¹⁵⁴ SMITH III, *Musical Applications of Digital Waveguides* cit.

<https://ccrma.stanford.edu/files/papers/stanm39.pdf>

¹⁵⁵ In seguito, Essl e Cook hanno proposto una nuova struttura di dati chiamata *Banded waveguides* – un ibrido di sintesi modale e a guida d'onda in cui ogni guida d'onda modella la propagazione delle onde attorno a un particolare modo del sistema – per modellizzare sistemi come le barre, dove sono presenti pochi modi fortemente inarmonici. Tale struttura venne poi estesa nella *Banded waveguide mesh*, una nuova struttura di dati a più dimensioni per permettere l'implementazione in tempo reale. Cfr.: GEORG ESSL – STEFANIA SERAFIN – COOK – SMITH III, *Theory of Banded Waveguides*, «Computer Music Journal», XXVIII (2004), pp. 37–50; ESSL – SERAFIN – COOK – SMITH III, *Musical Applications of Banded Waveguides*, «Computer Music Journal», XXVIII (2004), pp. 51-63.

Per contro, l'efficacia del modello deriva proprio dal fatto che le guide d'onda digitali simulano prodotti fissi: una volta costruito, il modello non può essere alterato, anche se i suoi parametri di controllo possono essere usati per estendere le capacità degli oggetti modellizzati. Castagné mette in evidenza la natura di tale approccio, il quale, da un lato, è di facile implementazione – contrariamente ad alcune tecniche maggiormente legate alla necessità di digitazione del codice – e controllabile in modo raffinato ed espressivo anche nelle composizioni in tempo reale, mentre, dall'altro, risulta essere meno flessibile dal punto di vista della progettazione del modello o della creazione di nuovi, inediti strumenti: lo schema per guida d'onda, così, «is modular, but its basic module, the delay-filter, can hardly be considered as a physical model in itself. The mental model it enables is meaningful, but does not seem very efficient when the goal is to let a musician handle the scheme at a basic level».¹⁵⁶

Inoltre, la possibilità di sviluppare le potenzialità artistiche di tale tecnica, come osserva Michon, sembrò essere stata influenzata dai vincoli stessi della licenza d'uso, appannaggio esclusivo, da più di trent'anni, del CCRMA della Stanford University, che ne promosse lo sviluppo mediante collaborazioni tra compositori e programmatori, e dall'azienda Yamaha interessata prevalentemente a ampliarne le potenzialità commerciali nel sintetizzatore VL-1 che implementava la modellizzazione di strumenti esistenti.¹⁵⁷

Sebbene per motivazioni diverse, lo stesso Smith, nel 1993, sostenne che sarebbe stato preferibile modellizzare innanzitutto gli strumenti tradizionali – poiché non si conoscono altri modi per generare suoni profondamente comunicativi partendo da zero e, per di più, gli strumenti musicali tradizionali sono caratterizzati da una facile riconoscibilità – per procedere, solo dopo una descrizione dettagliata di questi ultimi, ad una loro possibile distorsione:

Once the natural behavior of traditional instruments has been conveniently captured in the form of computational models, the evolution of musical instruments can transfer from “corporeal form” in terms of wood and metal, etc., to the virtual world of computational

¹⁵⁶ NICOLAS CASTAGNÉ - CLAUDE CADOZ, *10 Criteria for Evaluating Physical Modelling Schemes for Music Creation*, Digital Audio Effects Conference DAF-X, London 2003, p. 6.

¹⁵⁷ ROMAIN MICHON, *Modélisation physique d'instruments de musique par guides d'ondes numériques – enjeux, environnements existants, implémentation, perfectionnements et utilisation*, Master Thesis, Université Jean Monnet, Saint-Etienne 2012, p. 7.

models. At this point, they can begin an accelerated evolution. For example, virtual physical instruments may be distorted in ways that would be impossible in the real world, yet because they are model-based, distortions tend to remain recognizable to the listener as “morphs” of the basic instrument.¹⁵⁸

1.3.5 Synthesis Toolkit (STK)

A partire dagli anni Novanta, i musicisti hanno cercato di favorire, sempre più, l'implementazione delle tecniche di modellizzazione fisica in software emergenti quali Max/MSP, PureData, CSound, SuperCollider, etc., al fine di sfruttarne la modularità attraverso modelli e/o elementi che non necessitassero di una complessa programmazione. Tuttavia, tali software – generalmente dotati di interfacce grafiche ‘drag and drop’ (GUI, *Graphical User Interface*), come Max e SynthBuilder –,¹⁵⁹ presentavano spesso problemi di portabilità multiplatforma e di estensibilità da parte dell'utente. Anche altri ambienti non basati su GUI, come C-Sound, presentavano paradigmi di programmazione potenti ma complessi da gestire per chi non possedesse competenze informatiche avanzate. Da tali problematiche scaturì l'esigenza di sviluppare ambienti progettati per la prototipazione rapida di programmi di sintesi musicale e di elaborazione audio che potessero, però, consentire una programmazione multiplatforma in grado di collegare differenti ambienti di lavoro in funzione delle diverse esigenze artistiche e musicali.

All'inizio degli anni Novanta, Perry Cook, presso il CCRMA dell'Università di Stanford, iniziò a sviluppare il Synthesis ToolKit (STK), nell'ambiente di programmazione NeXTStep¹⁶⁰ – dotato di una serie di generatori di unità per il filtraggio, per l'input/output, etc., così come esempi di algoritmi di sintesi e di elaborazione audio –

¹⁵⁸ SMITH III, *Physical Modeling Synthesis Update* cit., p. 2.

¹⁵⁹ SynthBuilder è un'applicazione NEXTSTEP Music Kit estensibile dall'utente, orientata agli oggetti, per la progettazione interattiva in tempo reale e l'esecuzione di patch di sintetizzatori (specialmente modelli fisici) cfr: NICK PORCARO – WILLIAM PUTNAM – PAT SCANDALIS – TIM STILSON – JAFFE – SMITH III – SCOTT VAN DUYN, *SynthBuilder and Frankenstein: Tools for the Creation of Musical Physical Models*, in <<https://smartech.gatech.edu/bitstream/handle/1853/50815/PorcaroPutnam1996.pdf>> (accesso 10-11-2021).

¹⁶⁰ Cfr. JAFFE – LEE BOYNTON, *An Overview of the Sound and Music Kits for the NeXT Computer*, «Computer Music Journal», XIII (1989), pp. 48-55.

con particolare attenzione alla funzionalità multiplatforma, al controllo in tempo reale e alla facilità d'uso. A tal fine, Cook lavorò intensamente per dotare il STK sia di librerie per la modellizzazione fisica, sia di modelli fisici open source pronti all'uso e disponibili presso il CCRMA.¹⁶¹

Le motivazioni che spinsero Cook ad elaborare tale software sono esplicitate dallo stesso autore:

This whole world was created with no particular hardware in mind. These examples are intended to be tutorial in nature, as a platform for the continuation of my research, and as a possible starting point for a software synthesis system. The basic motivation was to create the necessary unit generators to do the synthesis, processing, and control that I want to do and teach about. Little thought for optimization was given and therefore improvements, especially speed enhancements, should be possible with these classes. It was written with some basic concepts in mind about how to let compilers optimize. Your question at this point might be, "But Perry, with CMix, CMusic, CSound, CShells, CMonkeys, etc. already cluttering the landscape, why a new set of stupid C functions for music synthesis and processing?" The answers lie below.

I needed to port many of the things I've done into something that is generic enough to port further to different machines.

I really plan to document this stuff, so that you don't have to be me to figure out what's going on. (I'll probably be sorry I said this in a couple of years, when even I can't figure out what I was thinking.)

The classic difficulties most people have in trying to implement physical models are:

They have trouble understanding the papers, and/or in turning the theory into practice.

The physical model instruments are a pain to get to oscillate, and coming up with stable and meaningful parameter values is required to get the models to work at all.

This set of C++ unit generators and instruments might help to diminish the scores of emails I get asking what to do with those block diagrams I put in my papers.

I wanted to try some new stuff with modal synthesis, and implement some classic FM patches as well.

I wanted to reimplement, and newly implement more of the intelligent and physical performer models I've talked about in some of my papers. But I wanted to do

¹⁶¹ COOK – SCAVONE, *The Synthesis ToolKit (STK)*, in *Proceedings of the International Computer Conference*, Beijing 1999, pp. 1-4.

it in a portable way, and in such a way that I can hook up modules quickly. I also wanted to make these instruments connectable to such player objects, so folks like Brad Garton who really think a lot about the players can connect them to my instruments, a lot about which I think.¹⁶²

Con il suo trasferimento all'Università di Princeton, nel 1996, Cook portò il tutto in C++ su hardware SGI, aggiungendo capacità in tempo reale e ampliando notevolmente le tecniche di sintesi disponibili. Con l'aiuto di Bill Putnam, realizzò la portabilità di STK su Windows 95. Nel 1997, Gary Scavone iniziò ad usare STK in modo estensivo e completò la portabilità completa di STK su Linux e su Windows (usando Direct Sound API) nell'anno successivo. Da allora sono stati apportati numerosi e continui miglioramenti ed estensioni del programma.

Essendo STK un linguaggio di progettazione in C++, con la possibilità del supporto audio e MIDI su molte piattaforme, versioni diverse delle classi di strumenti STK sono state integrate in Chuck, Csound, Real-Time Cmix, Max/MSP,¹⁶³ Pure Data¹⁶⁴, SuperCollider e seguito in FAUST, favorendo un uso più ampio dei modelli fisici nelle applicazioni musicali. Diverse collezioni di strumenti virtuali, provenienti dai differenti approcci di modellizzazione, iniziarono così ad essere diffusi quali, ad esempio, PeRColate, la libreria esterna di modelli fisici¹⁶⁵ in Max/MSP,¹⁶⁶ PMPD inclusa nell'ambiente Pure Data, Chuck.¹⁶⁷ In particolare, nella libreria PeRColate – un codice open source sviluppato da Dan Trueman alla Princeton University e R. da Luke DuBois alla Computer Music Center (CMC) della Columbia University – sono stati implementati diversi modelli, tra i quali il modello di flauto a guida d'onda (prima portato in STK), il modello Karplus-Strong per la corda pizzicata e i modelli Physem. La sintesi per guida

¹⁶² COOK, *Perry's Notes from the Original Distribution of STK*, in <<https://ccrma.stanford.edu/software/stk/information.html>> (accesso 26-12-2020).

¹⁶³ MILLER PUCKETTE, *Max at Seventeen*, «Computer Music Journal», XVI (2002), pp. 31-43; DAVID D. ZICARELLI, *An Extensible Real-time Signal Processing Environment for Max*, in *International Computer Music Conference Proceedings 1998*, s.n.p. [4 pp].

¹⁶⁴ PUCKETTE, *Pure Data: another integrated computer music environment*, in *Proceedings of the Second Intercollege Computer Music Concerts*, Tachikawa 1996, pp. 37-41.

¹⁶⁵ DAN TRUEMAN – LUKE DUBOIS, *PeRColate* (2005), <music.columbia.edu/PeRColate>; discusses Version 0.9b5. (accesso 20-11-2021).

¹⁶⁶ DAVID D. ZICARELLI, *An Extensible Real-Time Signal Processing Environment for Max* cit.; PUCKETTE, *Max at Seventeen* cit.

¹⁶⁷ GE WANG - COOK, *Chuck: A Concurrent, On-the-Fly, Audio Programming Language*, in *Proceedings of the International Computer Music Conference*, Singapore 2003, pp. 1-8.

d'onda sembra rappresentare l'approccio prevalente, a causa della sua implementazione compatta ed efficiente, che la rende particolarmente adatta per l'uso in tempo reale.¹⁶⁸ Quando viene implementato un controllo accurato, i parametri dei modelli per guida d'onda corrispondono, infatti, in numero e natura, ai parametri di controllo di uno strumento fisico, permettendo al musicista di avvicinarsi ai modelli virtuali in modo tanto intuitivo quanto lo sarebbe stato per uno strumento fisico.¹⁶⁹

1.3.6 La modellizzazione fisica in FAUST

L'uso di STK richiede una comprensione di base dei linguaggi C e C++ e la competenza per sviluppare soluzioni di programmazione per specifiche esigenze dell'utente, caratteristiche che, in questi ultimi anni, hanno portato gli studiosi a sfruttare le potenzialità offerte dai nuovi linguaggi emergenti, al fine di offrire un più agevole accesso ai processi di elaborazione del segnale.

Nell'ambito della modellizzazione fisica, iniziò a essere usato estensivamente FAUST (Functional AUdio Streaming)¹⁷⁰ – un linguaggio di programmazione per l'elaborazione del segnale digitale in tempo reale (DSP), sviluppato al GRAME di Lione dal 2002 – per l'implementazione di modelli di strumenti musicali per guida d'onda e modali,¹⁷¹ facilitata dall'ampia gamma di funzioni disponibili nelle librerie FAUST DSP e

¹⁶⁸ Una caratteristica interessante delle *waveguide* è che sono in gran parte compatibili con tutti i paradigmi propri dei linguaggi di sintesi music N dentro Csound. Ciò significa che i blocchi di costruzione delle reti di *waveguide* possono essere uniti con gli *unit generator*. Cfr. ROADS, *The Computer Music Tutorial* cit., p. 282.

¹⁶⁹ Le *waveguide* sono state utilizzate, ad esempio, come il motore dei sintetizzatori commerciali introdotti da Yamaha e Korg nel 1993 e 1994. Yamaha, nel 1994 ha rilasciato il VLI, un sintetizzatore basato su tecniche di modellizzazione fisica. Sfortunatamente, il VLI non ha avuto lo stesso successo commerciale del DX7, essendo piuttosto costoso, e richiedendo una specifica pratica per padroneggiare i diversi controller di cui era dotato.

¹⁷⁰ YANN ORLAREY – STÉPHANE LETZ – DOMINIQUE FOBER, *Faust: An Efficient Functional Approach to DSP Programming*, in *New Computational Paradigms for Computer Music*, a cura di Gérard Assayag e Andrew Gerzso, Delatour, Paris 2009.

¹⁷¹ ROMAIN MICHON – SMITH, *Faust-STK: a Set of Linear and Nonlinear Physical Models for the Faust Programming Language*, in *Proceedings of the 14th International Conference on Digital Audio Effects (DAFx-11)*, Paris 2011, pp. 199-204.

da una sintassi che combina due approcci: una programmazione funzionale (costituita da un linguaggio testuale) e i diagrammi a blocchi algebrici.¹⁷²

Julius O. Smith III implementò dapprima, una chitarra elettrica virtuale con le articolazioni gestuali correlate, e, in seguito, insieme a Romain Michon, una *mesh* per guida d'onda per modellizzare strumenti a percussione non lineari. Nello stesso periodo, i due ricercatori reimplementarono i modelli fisici basati sugli algoritmi 'originali' della STK e del programma SynBuilder, dando vita al *FAUST-STK*, un insieme di strumenti con alcuni nuovi modelli fisici: strumenti per guida d'onda non lineari, che utilizzano filtri passa-basso passivi non lineari; strumenti che usano filtri all-pass non lineari per creare inediti comportamenti, e strumenti, infine, che vengono modificati al fine di utilizzare i dati gestuali per controllare la performance.¹⁷³

Grazie alla specifica architettura di FAUST, questi strumenti possono essere utilizzati nella maggior parte dei programmi di sintesi audio (CSOUND, Max/MSP, PureData, SuperCollider, plug-in VST, etc.) o possono essere compilati come applicazioni stand-alone (interfaccia Qt o GTK con JackAudio, CoreAudio o Ladspa, etc.). I modelli FAUST-STK, sebbene condividano molte funzioni attraverso la libreria *instrument.lib* *FAUST*, sono ancora implementati come oggetti indipendenti, e le parti dello strumento virtuale non possono essere riutilizzate.

Più recentemente, è stato introdotto il *FAUST Physical Modeling Toolkit*, una collezione di strumenti per facilitare la progettazione di modelli fisici con il linguaggio di programmazione FAUST. Al suo interno è contenuta la *FAUST Physical Modeling Library* (FPML) (*physmodels.lib*),¹⁷⁴ un ambiente per creare modelli fisici di strumenti mediante la combinazione modulare di varie parti di strumenti musicali (ad esempio, bocchini, tubi, corde, corpi, etc.), ottenuta attraverso l'implementazione in FAUST di diagrammi a blocchi bidirezionali, che consente l'accoppiamento tra i moduli. Elementi di basso e alto livello possono essere, così, combinati per assemblare strumenti musicali digitali fisicamente informati esistenti o completamente nuovi.

¹⁷² MICHON – SMITH – ORLAREY, *New Signal Processing Libraries for Faust*, in *Proceedings of the Linux Audio Conference*, Saint-Etienne 2017, pp. 83-87.

¹⁷³ MICHON – SMITH, *Faust-STK: a Set of Linear and Nonlinear Physical Models for the Faust Programming Language*, cit.

¹⁷⁴ MICHON – SMITH III – CHAFE, WANG – MATTEW WRIGHT, *The Faust Physical Modeling Library: A Modular Playground for the Digital Luthier*, in *Proceedings of the 1st International Faust Conference (IFC-18)*, Mainz 2018, pp. 1-6.

Come parte del *FAUST Physical Modeling Toolkit* è stato poi sviluppato *mesh2faust*, un generatore di modelli fisici modali open-source compatibili con la FPML, che permette di progettare oggetti 3D e di convertirli in modelli fisici per la sintesi del suono. *Mesh2faust* può convertire qualsiasi rete volumetrica di un oggetto 3D in un modello fisico modale FAUST, estraendo informazioni modali dal risultato di un'analisi di elementi finiti (FEA). È possibile configurare un'ampia gamma di parametri per specificare le proprietà del materiale del modello, il comportamento del modello generato, etc. [fig. 1.14].¹⁷⁵

In generale, i modelli generati da *mesh2faust* possono essere facilmente integrati in modelli più grandi implementati con la FPML (ad es., una corda ad arco collegata a un corpo di violino generato da *mesh2-faust*, etc.), consentendo di implementare una vasta gamma di modelli fisici di strumenti musicali mediante l'uso di varie tecniche che semplificano notevolmente la progettazione e la prototipazione di nuovi strumenti musicali digitali fisicamente informati.

Ultimamente, *mesh2faust* e la FPML sono stati, inoltre, sviluppati come parte di un progetto sull'aumentazione dei dispositivi mobili verso una 'liuteria ibrida',¹⁷⁶ in cui protesi elettroniche e stampate in 3D sono aggiunte ai dispositivi *mobile* (iPad, iPhone, iPod Touch...) per trasformarli in strumenti musicali¹⁷⁷.

¹⁷⁵ Cfr. MICHON – SARA MARTIN – SMITH III, *Mesh2Faust: a Modal Physical Model Generator for the Faust Programming Language -Application to Bell Modeling*, in *Proceedings of the 2017 International Computer Music Conference, ICMC.*, Shanghai 2017.

¹⁷⁶ Cfr. MICHON – SMITH III – WRIGHT – CHAFE – JOHN GRANZOW – WANG, *Mobile Music, Sensors, Physical Modeling, and Digital Fabrication: Articulating the Augmented Mobile Instrument*, «Applied Sciences», VII (2017), pp. 1311-1320.

¹⁷⁷ MICHON – MARTIN – SMITH III, *Mesh2Faust cit.*

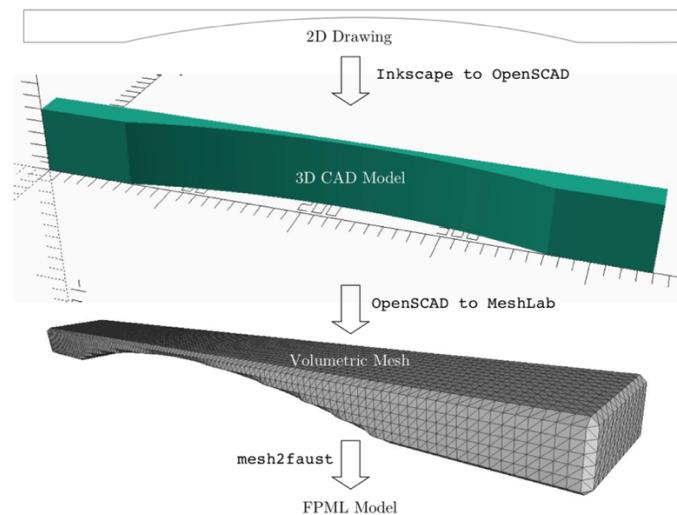


Fig.1.14 Rappresentazione delle fasi di l'implementazione di un modello fisico di marimba attraverso l'uso combinato di mesh2faust e della FAUST Physical Modeling Library (da MICHON – SMITH III – CHAFE, WANG – WRIGHT, The Faust Physical Modeling Library, p. 4).

Alcune recenti ricerche, al CCRMA, sul linguaggio di programmazione FAUST mirano a facilitare l'integrazione di applicazioni musicali *mobile* con modelli fisici di strumenti musicali. *Faust2api*, ad esempio, è uno strumento per generare motori DSP, accessibili attraverso interfacce di programmazione di alto livello, che possono essere facilmente trasformati in sintetizzatori polifonici controllabili via MIDI o effetti audio con supporto di sensori integrati, etc.; *faust2smartkey* – che utilizza *Faust2api* – è uno strumento per generare applicazioni musicali Android e iOS pronte all'uso con un'interfaccia utente, configurata direttamente nel codice FAUST, che permette di implementare una vasta gamma di controller (tastiere di base, tastiere isomorfe, pad, controller X/Y, etc.) su un touch-screen.

Oltre alla sintesi modale e per guida d'onda, sono stati implementati in FAUST i modelli fisici di interazione di massa, esplorati per la prima volta da Edgar Berdahl e Smith con Synth-A-Modeler¹⁷⁸, uno strumento che fornisce un ambiente grafico di alto livello di liuteria digitale per generare modelli fisici utilizzando una combinazione di interazione di massa e guide d'onda digitali. Synth-A-Modeler usa al proprio interno il compilatore FAUST per generare moduli DSP binari sintetizzati secondo le caratteristiche

¹⁷⁸ EDGAR BERDAHL – SMITH III, *An Introduction to the Synth-A-Modeler Compiler: Modular and Open-Source Sound Synthesis Using Physical Models*, in *Proceedings of the Linux Audio Conference*, Stanford 2012, pp. 93-99.

di un modello analogico meccanico, consentendo agli artisti di poter disporre, così, di oggetti *black-box* che possono essere agiti e osservati, in tempo reale, attraverso ingressi e uscite, utilizzando un'applicazione host audio (PureData, Max, standalone, etc.) [fig. 1.15].¹⁷⁹

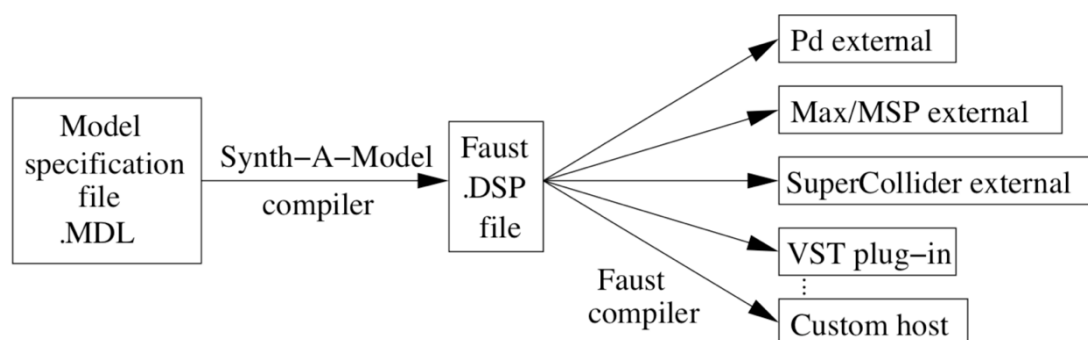


Fig. 1.15 Rappresentazione del flusso di dati in FAUST (da < <http://lac.linuxaudio.org/2012/download/synth-a-modeler.pdf> > (accesso 10-11-2021).

Interessante notare, infine, nel campo delle implementazioni in FAUST per la formalizzazione di modelli fisici, tra gli innumerevoli sviluppi, in continua e veloce evoluzione, l'integrazione, per la prima volta, delle tecniche *Finite Difference Schemes* (FDSs), all'interno di tale linguaggio.¹⁸⁰ Nel 2021, in continuità con i lavori precedenti sui modelli di interazione di massa, è stato introdotto un metodo per codificare gli FDS in modalità di programmazione funzionale, per poi tracciare una connessione tra FDS e automi cellulari, al fine di costruire una libreria di strumenti che permettano di progettare ad un livello molto alto modelli fisici di strumenti musicali pronti all'uso. Sebbene, attualmente, i modelli generati da questo sistema siano lontani dall'essere accurati, offrono comunque un modo agevole ai compositori e ai musicisti per progettare strumenti personalizzati ed espressivi utilizzabili nel contesto musicale.

¹⁷⁹ Più recentemente, estendendo il lavoro di Berdahl, è stato introdotto *mi_faust* che include *mi.lib*, una libreria FAUST che può essere usata per assemblare modelli di interazione di massa direttamente in FAUST in modo modulare.

¹⁸⁰ RICCARDO RUSSO – STEFANIA SERAFIN – MICHON – ORLAREY – LETZ, *Introducing Finite Difference Schemes Synthesis in FAUST: A Cellular Automata Approach in SMC2021*, in *18th Sound and Music Computing Conference*, Torino 2021, pp. 11-18.

1.4 Conclusioni

Nei suoi cinquant'anni di storia, l'approccio della *Physically-Based Modeling* (PBM), emerso in opposizione alla tradizionale PM – appannaggio, fino agli anni Settanta, dell'acustica musicale tradizionale orientata alla migliore comprensione dei meccanismi reali degli strumenti – si è notevolmente sviluppato, espandendosi progressivamente nei differenti campi di ricerca e nelle pratiche creative della computer music.

Muovendosi da una concezione del tutto diversa dalle altre tecniche di sintesi basate sul segnale, fin dai primi studi, la PBM ha sviluppato, come uno degli obiettivi principali di ricerca, la formalizzazione di tecniche di modellizzazione – quali, come visto nel corso del capitolo, l'approccio dell'interazione di massa, quello modale e per guida d'onda – adeguate alle esigenze dei musicisti, in funzione sia della qualità dei suoni, sia dell'usabilità, della possibilità, cioè, per un musicista di praticare la modellizzazione fisica in autonomia, 'piegandola' efficacemente alle proprie esigenze creative.

Così, se tra gli ultimi anni Settanta e i primi anni Novanta si è assistito al rapido sviluppo e al consolidamento dei linguaggi fondamentali della modellizzazione, nei decenni successivi quest'ultima si è spostata solo molto lentamente dai laboratori agli studi privati, in seguito alla progressiva implementazione di tali tecniche all'interno di ambienti di programmazione più generali – il STK, le varie librerie all'interno di Max, PD, etc. – con l'obiettivo di espanderne le potenzialità musicali attraverso algoritmi modulari riutilizzabili e strumenti integrati *physically based*.

L'ultimo decennio ha, inoltre, messo in evidenza l'esigenza, da parte dei musicisti, di poter accedere a tali modelli attraverso modalità operative non specifiche della PM, in un contesto integrato, all'interno del quale, l'uso 'incrociato' dei diversi metodi di sintesi del segnale o della sorgente possano dialogare in funzione delle esigenze creative dell'artista. In tal senso, l'uso del linguaggio FAUST è paradigmatico delle più recenti istanze artistiche della computer music, improntate alla facilità di accesso, alla cross-modalità dei processi di sintesi e di controllo, che contraddistinguono la fluidità delle attuali pratiche digitali.

In tale contesto, l'elaborazione di modelli in tempo reale e la ricerca di espressività per gli strumenti digitali ha costituito, fin da subito, una delle principali preoccupazioni della PBM, ulteriormente arricchitasi, negli ultimi anni, delle potenzialità delle interfacce

aptiche in grado di generare feedback gestuali rilevanti per la performance in tempo reale, all'interno di un crescente interesse per le dinamiche strumentali multisensoriali della creazione artistica, nel più ampio ambito dell'interazione uomo-computer.

L'integrazione delle tecniche del segnale e di modellizzazione, oggi così diffusa negli ambiti creativi più avanzati degli ambienti digitali, ha radici lontane, e testimonia la vocazione artistica della sintesi per modelli fisici, la quale come Bilbao ha ben messo in evidenza, si inseriva naturalmente, sin da subito, nel quadro dell'elaborazione digitale del suono, costituendo una naturale estensione delle tradizionali tecniche più astratte del segnale, attraverso, ad esempio, il legame diretto «between modal synthesis and additive synthesis, as well as that between digital waveguides and wavetable synthesis, via the Karplus–Strong algorithm».¹⁸¹

L'obiettivo iniziale della PBM non è tanto quello di riprodurre alla perfezione gli strumenti acustici, sebbene una parte delle ricerche svolte con questo approccio vada proprio in tale direzione (vedi per esempio [Smith 1996]) e abbia dato vita ad un corpus di lavori incentrati sulla simulazione di strumenti musicali sviluppato dagli acustici musicali. La modellizzazione richiede, piuttosto, un processo di sintesi: idealmente, il modello emerge da una costruzione di elementi fisicamente rilevanti, non dalla ricostruzione analitica dello strumento reale. La nozione di modello gioca qui un ruolo essenziale, in quanto astrazione che mira a condensare in modo formale l'informazione rappresentata da un insieme di parametri. L'informatico, così, costruisce un suo modello concettuale di strumento e ne sviluppa l'insita e conseguente prassi esecutiva. I vari formalismi elaborati nel campo della PBM costituiscono, dunque, modalità diverse di rappresentare lo strumento e l'insieme delle 'gestualità' ad esso correlate. Più precisamente, mentre gli strumenti acustici sono caratterizzati dal meccanismo di produzione del suono, le classi di suoni sintetici sono caratterizzate dalla specifica struttura dell'algoritmo.

Nonostante questo, l'imitazione gioca un ruolo essenziale poiché lo sviluppo di suoni inediti si basa strategicamente sulla possibilità di simulare strumenti esistenti: saper imitare il reale permette di poterlo meglio sovvertire. Infatti, sebbene l'imitazione in senso stretto possa avere rilevanti ricadute pratiche per i musicisti, non corrisponderà

¹⁸¹ BILBAO, *Numerical Sound Synthesis: Finite Difference Schemes and Simulation in Musical Acoustics*, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ 2009, p. 8.

mai ad un reale potenziamento dei loro strumenti creativi, qualunque sia la complessità del modello. Nel suo lavoro di ricerca, lo stesso Smith sostiene, a proposito, che sia stato preferibile modellizzare innanzitutto gli strumenti tradizionali – costituiti da suoni profondamente comunicativi e caratterizzati da una facile riconoscibilità – per procedere, solo dopo una descrizione dettagliata di questi ultimi, ad una loro possibile distorsione:

Why don't we focus mainly on exciting new instruments that are light-years beyond preexisting instruments? One short answer to this question is that artificially computed sounds tend to sound artificial. In other words, we simply don't know very many ways to generate deeply communicative sounds from scratch. Another answer is that traditional musical instruments are important because they are recognizable. Communication via sound waves is generally symbolic, referring to a shared library of common experience. Traditional musical instruments provide the important vocabulary necessary to articulate musical statements in terms of the prior repertoire. Also, attempting parity with traditional musical instruments provides an excellent test of our ability to construct efficient models, since we can test by direct comparison how well the model performs. Once the natural behavior of traditional instruments has been conveniently captured in the form of computational models, the evolution of musical instruments can transfer from "corporeal form" in terms of wood and metal, etc., to the virtual world of computational models. At this point, they can begin an accelerated evolution. For example, virtual physical instruments may be distorted in ways that would be impossible in the real world, yet because they are model-based, distortions tend to remain recognizable to the listener as "morphs" of the basic instrument.¹⁸²

Lungo questo asse di ricerca, costituito dai due poli opposti di realtà, da un lato, e virtualità, dall'altro, si collocano, così, i principali formalismi della PBM, alcuni più naturalmente votati ad esplorare la dimensione imitativa (ad esempio, le guida d'onda), altri, invece, come nel caso dell'approccio di interazione di massa, più portati a sperimentare la costruzione di modelli in grado di sintetizzare suoni che non hanno alcuna controparte nel reale. La sintesi tramite modelli fisici può essere considerata, invece, essa stessa come un generatore di realtà musicale a sé stante, che i suoni prodotti evocano o meno i suoni di un oggetto reale:

¹⁸² SMITH III, *Physical Modeling Synthesis Update* cit., p. 2.

From our point of view, synthesis by physical models-being a sort of a musical reality "generator" on its own-makes it possible to take inspiration from the real world in order to derive our interpretation of it without forcing us to limit experimentation to the usual physical equations. This leads us to focus our attention on the structures, and marginally on the physical interpretation. Structures are responsible for the generation of homogeneous sounds, while interpretations can be considered as useful or limiting tools, depending on particular situations.¹⁸³

L'interpretazione fisica facilita il controllo parametrico dello strumento, fornendo un modello concettuale vicino all'esperienza del musicista. Si pensi, in tal caso, ad una tipologia di approccio, come quella per guida d'onda, che, partendo proprio da una descrizione dello strumento reale, offre la possibilità di 'estendere' e alterare i parametri di controllo del modello virtuale, costruendo strumenti estesi, come si vedrà nel capitolo seguente, quali il flauto virtuale lungo 20 piedi usato da Paul Lansky in *Things She Carried* (1996), che pur essendo irraggiungibili nel mondo fisico, sono pur tuttavia ancora legati a quel mondo.

In funzione di un più fecondo esito artistico, è, inoltre, possibile sperimentare strutture che non siano ancorate alla realtà fisica, e in cui quest'ultima viene presa solo come fonte di ispirazione per aiutarne la concettualizzazione, come, ad esempio, utilizzare vari modelli modulari reali per assemblare un modello di una struttura vibrante complessa del tutto inedita. È così possibile, nell'approccio modale, simulare strumenti che cambiano forma o dimensione durante la riproduzione, producendo naturalmente variazioni di altezza o di timbro: strutture ibride, ancorate alla realtà nelle componenti costitutive, ma al tempo stesso del tutto altre nella configurazione finale.

Andando ancora oltre, ci si può impegnare in un'esplorazione totalmente libera delle possibilità della modellizzazione fisica, decidendo di rinunciare completamente all'imitazione delle strutture vibranti naturali per sfruttare gli aspetti non fisici che ogni sistema di modellizzazione introduce necessariamente. Il paradigma di interazione di massa, ad esempio, costruisce oggetti concettuali astratti, che pur corrispondono direttamente a oggetti materiali realmente elementari. Il sistema Cordis-Anima permette quindi di costruire, con l'aiuto di collegamenti non lineari, oggetti senza alcun

¹⁸³ BORIN – DE POLI – SARTI, *Algorithms and Structures for Synthesis Using Physical Models* cit., p. 40.

significato fisico evidente. Come sottolineato in Borin-De Poli-Sarti¹⁸⁴, si tratta di modelli pseudofisici non ancorati alla realtà fisica, ma i cui unici vincoli sono la stabilità e la passività, elementi essenziali che garantiscono la ‘fattibilità acustica’ dei suoni prodotti.

Alla base di tali processi appare strategico, come profetizzato da Risset, il ritorno alla causalità – una componente perduta con l’introduzione del digitale (§ 1.2.2) – la quale permette di produrre suoni naturalmente significativi per le nostre orecchie, le cui diverse dimensioni sono coerentemente legate dalla fisicità del processo che li ha generati. Di conseguenza, l’oggetto modellizzato è percepito come strumento in sé autonomo e coerente. Esso deriva da una discretizzazione – di volta in volta differente a seconda del formalismo di base utilizzato per modellizzarlo – basata su comportamenti di alto livello (propagazione delle onde, modi di vibrazione...) non specificati dal musicista, ma che emergono, comunque, dalla struttura dei modelli e dalle proprietà dei moduli assemblati, cosicché, mentre gli strumenti acustici sono caratterizzati dal meccanismo di produzione del suono, le famiglie di suoni sintetici sono caratterizzate dalla struttura stessa dell’algoritmo.

Gli strumenti virtuali, così, al pari di quelli acustici, sono dotati *ab origine* di una propria ricchezza timbrica in sé coerente, che rende il comportamento dinamico e la ‘suonabilità’ dei modelli a base fisica di particolare interesse espressivo. All’interno di tale stabilità complessiva della struttura, contrariamente ai modelli basati sul segnale, risulta difficile modificarne indipendentemente i parametri percettivi (*loudness*, timbro...), dato che la modifica di un parametro tramite un input gestuale (in tempo reale o differito) produce, comunque, un effetto coerente sulla percezione, creando in modo organico variazioni dinamiche sottili e plausibili.

Al contrario dei modelli orientati al segnale, la modellizzazione fisica non necessita, dunque, di una mappatura degli input del gesto sui parametri – sia nell’ambito delle simulazioni in tempo reale sia in tempo differito – ma permette una rappresentazione intuitiva delle azioni che si compiono con gli oggetti reali e con gli strumenti musicali, come pizzicare, colpire, etc. Ciò permette di utilizzare metafore del gesto strumentale, in mutevole interscambio tra realtà e virtualità, che consentono al musicista di agire creativamente. Così, l’approccio per guida d’onda si costituisce come formalismo che

¹⁸⁴ Cfr. BORIN – DE POLI – SARTI, *Algorithms and Structures for Synthesis Using Physical Models* cit.

ingloba nella propria sintassi l'interdipendenza di strumento e gesto: ad esempio, il flauto virtuale lungo 20 piedi usato da Paul Lansky emette suoni che derivano intrinsecamente dallo specifico gesto modellizzato. Nell'approccio modale, la metafora si declina nella modularità 'a grana grossa' costituita da frammenti di strumenti e gesti, liberamente configurabili secondo le esigenze compositive, mentre ancora più estremo ne appare l'impiego nel formalismo dell'interazione di massa, in cui la metafora viene estesa non solo agli oggetti/strumenti, ma anche alle figure dell' 'esecutore' e del 'direttore', secondo una gerarchia del tutto fluida: esemplare a proposito il brano di Cadoz *pico..TERA*, di cui si parlerà ampiamente nei capitoli 2 e 3.

Più specificatamente, l'uso della metafora si intreccia strategicamente con la strutturazione modulare degli ambienti di modellizzazione, agendo in misura diversa e con esiti del tutto diversi nella gestione da parte dell'artista dei differenti sistemi di progettazione. Se la modularità è da intendersi come l'azione combinata di un certo numero di componenti, dotati di una funzione elementare ben definita, ne risulta, infatti, che il ruolo dell'artista, all'interno di tali sistemi, non venga limitato da un insieme di funzionalità determinate dai progettisti, ma si delinei più liberamente nella definizione di un insieme di elementi discreti e nella loro interconnessione.

Ma all'interno di tale paradigma operativo, fondato sulla modularità strutturale dei linguaggi di modellizzazione, si dovrà necessariamente fare i conti con i processi di imitazione o di metaforizzazione o di completa astrazione, frutto della concettualizzazione della realtà costituita dai progettisti, con la quale l'artista dovrà porsi necessariamente in relazione. Così, all'interno del vasto campionario della liuteria virtuale, l'imitazione e la metaforizzazione si intrecciano in proporzioni idealmente inverse nella rappresentazione mentale dell'oggetto: dove prevale l'imitazione si osserverà una maggiore fissità modulare della copia virtuale corrispondente, all'opposto, negli ambienti molto modulari come quelli dell'interazione di massa, il compositore potrà basare il suo lavoro sullo sviluppo della propria intuizione, astraendo da qualsivoglia processo imitativo, attraverso un totalizzante impiego della metafora. In tal caso, nel campo puramente astratto della virtualità, la metafora si pone al servizio di un sistema, opposto all'imitazione del mondo fisico, che è generatore di realtà: una realtà che si rivela del tutto altra pur rimanendo plausibile, poiché fondata sui vincoli della fisica newtoniana.

Nel prossimo capitolo, si affronterà, in dettaglio, l'analisi del vasto corpus di liuteria virtuale, constatando l'emergere di più livelli, fluidi e idealmente interagenti, di allontanamento dalla realtà fisica – imitazione, metaforizzazione, astrazione –, che attraversano i diversi formalismi di cui si è discusso, determinando una molteplicità di esiti e di pratiche.

Così, ad esempio, all'interno della tecnica per guide d'onda, in cui la modularità si risolve nella descrizione del meccanismo del risonatore dello strumento reale, in una logica del tutto imitativa, si individueranno strumenti virtuali, i quali, una volta specificamente codificati e implementati, risultano fissati in modo tale da non poter essere cambiati né in parte, né del tutto. Ne consegue una particolare categoria di strumenti a disposizione del compositore che eccellono nell'espansione timbrica di uno strumento esistente e nella conservazione delle sue caratteristiche sonore attraverso i registri.

Per contro, le potenzialità dei metodi più modulari – sintesi modale e paradigma d'interazione di massa – consistono nella capacità di simulare moduli vibranti liberamente riconfigurabili costituiti da strutture risonanti come ponti e tavole nella sintesi modale, e da unità più elementari nel sistema di reti massa-molla. Di conseguenza, la sintesi modale facilita la simulazione di strutture ibride, le cui identità sonore emergono dalle proprietà dei moduli assemblati, mentre l'approccio mass-spring-damper eccelle nella creazione delle forme vibranti più astratte – le quali permettono la metaforizzazione di tutti i parametri musicali, compresa la strumentazione, la composizione, l'esecuzione e la spazializzazione –, che facilitano la creazione di qualsiasi sistema vibrante immaginabile, consentendone un livello superiore di astrazione.

Nel prossimo capitolo si identificheranno, a partire da tali formalismi e strumenti, paradigmi operativi profondamente diversi: un primo filone – incentrato su un'idea 'forte' di strumento, che non richiede al musicista di operare direttamente la modellizzazione – principalmente riferito agli approcci per guide d'onda e modale; un secondo filone costituito da metodi fortemente modulari, come quello dell'interazione di massa orientato al *physical thinking*, un pensiero fisico intuitivo radicato nella stessa struttura algoritmica di tale formalismo, il quale, non essendo specificamente dedicato alle strutture sonore, permette di costruire modelli fisici partendo da moduli di materia

caratterizzati da comportamenti fisici facilmente intuibili – quali le nozioni di inerzia, smorzamento, interazione fisica, etc. – che attraversano il nostro corpo e la nostra quotidianità.¹⁸⁵ In tal senso, come già visto nel corso del capitolo (§ 1.3.2.1), l'ambiente Genesis o il più recente sistema Hélicanthe partendo dalla quantizzazione della materia fisica e del tempo, permettono di progettare e simulare oggetti virtuali che possono essere visti, sentiti e manipolati.

¹⁸⁵ Cfr. CASTAGNÉ – CADOZ, *Creating Music by Means of 'Physical Thinking': The Musician Oriented Genesis Environment*, in *Proceedings of the 5th International Conference on Digital Audio Effects (DAFX-02)*, Hamburg 2002, [6 pp.]

Capitolo II

Strumenti virtuali e prassi esecutive: un excursus nel repertorio

2.1 Introduzione

La modellizzazione fisica degli strumenti musicali rappresenta, sin dalla metà degli anni Ottanta, un settore particolarmente fecondo della ricerca sulla sintesi del suono, nonostante, in quegli anni, il controllo dei modelli virtuali in grado di produrre suoni realistici, implicasse, a differenza di altre tecniche di sintesi, un'ingente quantità di calcoli e la creazione di complessi algoritmi ed equazioni, che comportavano delle difficoltà nell'uso performativo del modello. La sfida, dunque, consisteva nel creare un modello che potesse suonare esattamente come lo strumento, o il suono, che si intendeva imitare, in modo facilmente accessibile al musicista, consentendogli di gestirlo senza entrare nella programmazione più avanzata.¹

Se, in quegli anni, lo sviluppo di modelli soddisfacenti poteva essere difficile e dispendioso in termini di tempo, e appannaggio del lavoro d'équipe nei centri di ricerca specializzati, le implementazioni successive permisero di modificare sostanzialmente tale approccio, consentendo un più facile e intuitivo accesso al modello, con la possibilità di gestire sia i comportamenti dinamici intrinseci al suono prodotto, sia una complessità timbrica analoga alla controparte acustica.² Implementazioni quali, ad esempio, la

¹ Gli strumenti virtuali sono accessibili al musicista secondo modalità anche molto diverse. Tra i primi ad affrontare la questione Gianpaolo Borin, Giovanni De Poli e Augusto Sarti, che in un articolo del 1992, fanno riferimento alla modularità dei componenti del modello basato sulla fisica che può facilitare la sperimentazione da parte del musicista. Il progettista di strumenti virtuali, indipendentemente dalla tecnica di modellizzazione, può pianificare variazioni quasi infinite di diverse sfaccettature del modello che influenzano i risultati timbrici e comportamentali. Si possono adottare sia l'approccio '*black box*' che quello '*white box*'. Un approccio alla progettazione del modello *black box* equivale a descrivere un dato blocco in base al suo comportamento di input-output, senza ulteriori ipotesi sulla sua struttura interna, e può essere più efficiente dal punto di vista computazionale e concettualmente semplice. Il termine *white-box* indica, invece, che il blocco è modellizzato da ulteriori decomposizioni in elementi fisici più fini, consentendo al progettista di accedere al funzionamento interno del modello ed è di solito preferito quando si dà priorità alla sperimentazione. Cfr. al proposito GIANPAOLO BORIN – GIOVANNI DE POLI – AUGUSTO SARTI, *Algorithms and Structures for Synthesis Using Physical Models*, «Computer Music Journal», XVI (1992), pp. 30-42.

² Cfr. NICOLAS CASTAGNÉ – CLAUDE CADOZ, *10 Criteria for Evaluating Physical Modelling Schemes for Music Creation*, Digital Audio Effects Conf. DAF-X, London 2003, pp. 1-7; BORIN – DE POLI – SARTI, *Algorithms and Structures for Synthesis Using Physical Models* cit.

sintesi modale in Modalys e Tassman, le reti massa-molla in Genesis, e, successivamente, soprattutto applicazioni come il Synthesis ToolKit, e le diverse librerie di modelli all'interno di Max, PD, etc., fino alle implementazioni dell'ultimo decennio in linguaggi di programmazione come FAUST (§ 1.3.5, 1.3.6), si inscrivono all'interno di un processo, sul lungo periodo, che ha consentito al compositore di diventare progettista del proprio *instrumentarium* virtuale, senza la necessità di entrare nella programmazione diretta.

Come specificato in Borin *et al.*, l'obiettivo della sintesi per modelli fisici è, appunto, quello di realizzare modelli per la generazione di suoni, a cui l'utente possa accedere in modo naturale e intuitivo sia durante il processo di composizione, sia durante l'esecuzione. Infatti, essendo i modelli fisici una sorta di generatori di realtà musicale, anche distanti dall'interpretazione del reale, ed, anzi, proiettati alla concettualizzazione di quest'ultima, il loro unico vincolo consiste nell'essere stabili e passivi, proprietà che, consentendo di scegliere le variazioni parametriche e di prevederne gli effetti sull'output, forniscono un modello concettuale che si avvicina all'esperienza del musicista, pur permettendogli di sperimentare strutture non ancorate alla realtà fisica.³

Il modello, così, si costituisce nella dimensione strumentale-performativa, necessaria perché possa, non solo generare suono, ma, soprattutto, generare musica:

Virtual musical instruments are fast, computational models that implement the “audible essence” of a musical instrument and associated effects in real time. The model should not only sound like the real thing, it should also play like the real thing (from the perspective of a human performer interfaced to the model via specialized controllers and sensors). Of course, a virtual instrument is allowed to surpass the quality and playability of its real-world counterpart, when possible, and this as already occurred in a number of instances.⁴

Così, Smith sottolinea con forza la natura di strumento dei modelli virtuali, richiamando alla manualità dell'oggetto originario, cui partecipano sostanzialmente, non solo

³ Cfr. GIANPAOLO BORIN – GIOVANNI DE POLI – AUGUSTO SARTI, *Algorithms and Structures for Synthesis Using Physical Models*, «Computer Music Journal» XVI (1992), pp. 30-42.

⁴ JULIUS O. SMITH III, *Physical Audio Signal Processing for Virtual Musical Instruments and Digital Audio Effects*, Palo Alto (USA), Stanford University 2010, vol. 3, p. 3.

assimilandosi a quest'ultima, ma, addirittura, superandone le possibilità intrinseche. È in questo senso che egli si definisce un costruttore di strumenti musicali, senza ulteriore specificazione,⁵ poiché gli strumenti acustici virtuali dispongono di tutta una serie di controlli intuitivi ed espressivi, che mancano, invece, agli algoritmi di sintesi astratti, destinati solamente alla codifica e alla riproduzione del suono.⁶

Gli strumenti virtuali non fanno, dunque, eccezione alla regola secondo la quale è solo nelle mani del musicista-utente che lo strumento musicale manifesta le sue possibilità, il suo ruolo e il suo vero significato. In questo senso, una lettura critica del ruolo e della funzione di tali strumenti va inserita nel contesto della cosiddetta *critical organology*,⁷ che cerca di ridefinire i criteri dell'organologia tradizionale aprendosi ad ogni tipologia di *sounding object*,⁸ in cui lo strumento si costituisce come 'sede dell'azione', un'azione refrattaria ad ogni rigida tassonomia, che potrebbe derivare dalle modalità del suo apparire, ed aperta, invece, ad accogliere i frutti di un'interazione agente che può configurare orizzonti del tutto nuovi: «possiamo allora rileggere lo strumento – dal latino *instruere* ossia disporre, apparecchiare, configurare – non come il “disposto” o “apparecciato” ma ciò che dispone e configura».⁹

L'intento di questo capitolo, nel suo tentativo di mappare la molteplicità degli assetti ideativo-performativi, consiste proprio nel cercare di comprendere ciò che lo strumento virtuale «dispone e configura». La natura della sintesi, come pure le modalità esecutive che ne derivano, testimoniano dell'esistenza di un vero e proprio universo di possibilità che rende vano ogni tentativo di costituire delle categorie omnicomprensive. È proprio in virtù della complessità del fenomeno informatico che risulta, dunque, più fecondo mappare – nel senso di una dislocazione topologica che richiama una struttura a rizoma fluida e continuamente ri-configurabile –,¹⁰ anziché classificare, oppure tentare

⁵ HUD NORDIN, *HighTech Heroes VI: Julius Smith and David Jaffe*, Mountain View (US), 1983, in <<http://youtu.be/15jG1zfx-IM>> (accesso 12-12-2021).

⁶ Cfr. SMITH III, *A History of Ideas Leading to Virtual Acoustic Musical Instruments*, in *IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics*, 2005, New Paltz 2005, pp. 299-306.

⁷ JOHN TRESCH – EMILY I. DOLAN, *Toward a New Organology: Instruments of Music and Science*, «Osiris», XXVIII (2013), pp. 163-185.

⁸ RENATO MEUCCI, *Organologia: definizione e contenuti di una recente ricerca*, in *Il museo degli strumenti Musicali del Conservatorio Luigi Cherubini*, a cura di Mirella Branca, Sillabe, Livorno 1999, pp. 108-119.

⁹ GIULIA ACCORNERO, *Un'organologia critica per una nuova liuteria*, in *Fare strumento. Composizione, invenzione del suono e nuova liuteria*, a cura di Gabriele Manca e Luigi Manfrin, «Quaderni del Conservatorio Giuseppe Verdi di Milano», n.s. I (2017), ETS, Pisa 2018, pp. 13-23.

¹⁰ I termini 'mappa' e 'rizoma' sono qui utilizzati nell'accezione di Deleuze e Guattari. Cfr. in part. GILLES DELEUZE – FÉLIX GUATTARI, *Millepiani. Capitalismo e schizofrenia*, Napoli-Salerno, Orthotes 2017.

la riconfigurazione di categorie che appartengono più propriamente ad altri, più tradizionali, ambiti.¹¹

Poiché ogni strumento virtuale, in quanto costruito nella non neutralità delle tecniche, dispone di proprie peculiarità, che ne influenzano le risultanze possibili, la sua realizzazione riconduce alla progettualità sottintesa del suo autore, di cui reca i segni e al tempo stesso i limiti, circoscrivendo un microcosmo che si costituisce come suo invero. Tale microcosmo, anche in relazione alla progressiva evoluzione delle interfacce, consente di poter conseguire un'esperienza globale per mezzo di strumenti tecnologici mediante i quali l'interazione si trasforma in evento.¹² Un evento promosso da processi tipici della cultura materiale, la cui narrazione storica implica sia l'attenzione ai manufatti, sia alle modalità di costituzione in quanto oggetti, sia alle modalità d'uso, sia, infine, alla costruzione di senso. In un tale contesto, la disamina delle diverse soluzioni ideativo-performative succedutesi storicamente, che costituisce il nucleo centrale del presente capitolo, non ha una funzione puramente descrittiva, ma, piuttosto, necessariamente esplicativa dell'interazione fondante tra le tecniche e l'uomo, di come le tecniche costituiscano, sempre di più, l'ambito dell'umano, all'interno del quale, sempre di più, l'umano finisce per spiegare se stesso.

Sebbene il campo e il concetto stesso di strumento virtuale sia tanto eterogeneo, quanto in continua ridefinizione, il presente capitolo è incentrato su una topologia esplicativa¹³ – strumenti estesi, ibridi e astratti – che ha una sua storicità, e il cui utilizzo è giustificato, da un lato, dalla possibilità di rispecchiare la concettualità soggiacente che lega la rappresentazione del modello alla sua concreta realizzazione in strumento, e, dall'altro, dalla conseguente interrelazione con la letteratura musicale che è stata prodotta negli ultimi quaranta anni, la quale contrappunterà la trattazione degli

¹¹ Cfr. MARCO RUSSO, *Problemi di organologia contemporanea: gli strumenti virtuali*, in *Il nuovo in musica*, a cura di Rossana Dalmonte e Francesco Spampianto, LIM, Lucca 2008, pp. 173-186.

¹² LEV MANOVICH, *Information as an Aesthetic Event*, Lecture at the Tate Modern, London 8 settembre 2007, in <<http://manovich.net/index.php/projects/information-as-an-aesthetic-event>> (accesso 12-12-2021).

¹³ Il concetto di topologia è mutuato da Kojis, Serafin e Chafe che lo impiegano per designare non tanto una categorizzazione astratta degli algoritmi, quanto, piuttosto, la loro implementazione reale in strumento, in relazione all'articolazione da loro proposta in strumenti virtuali estesi, ibridi ed astratti. Il termine in origine significa «studio dei luoghi» e rimanda ad una interpretazione spaziale della disposizione dei componenti di una rete, ovvero la sua 'forma'. Cfr. JURAJ KOJIS – STEFANIA SERAFIN – CHRIS CHAFE, *Cyberinstruments via Physical Modeling Synthesis: Compositional Applications*, «Leonardo Music Journal», XVII (2007), pp. 61-66.

strumenti virtuali e sarà, poi, oggetto, tramite appositi *case studies*, del capitolo conclusivo del presente lavoro.

Così, per ognuna delle tre categorie di strumenti virtuali si è proceduto a offrire una panoramica della produzione musicale, cercando di evidenziare la relazione tra tecniche di modellizzazione, caratteristiche del modello e ricaduta sulle pratiche performative e compositive. Inoltre, poiché la costruzione di sistemi di controllo – come, ad esempio, tastiere, dispositivi aptici e non, strumenti acustici o segnali audio, etc. – costituisce un elemento fondamentale per il funzionamento degli strumenti virtuali, la ricostruzione dei contesti performativi si interrelaziona strategicamente con tale aspetto, cruciale per la relazione stessa esecutore-strumento.

Se nella terza parte di tale ricerca, si mirerà, in modo più specifico, a evidenziare i processi compositivi e i linguaggi scaturiti dalla specificità degli strumenti virtuali, in questo capitolo l'intento sarà piuttosto quello di indagare l'identità degli strumenti, non tanto descrivendone le specificità nel dominio astratto della programmazione, quanto, piuttosto, in quello concreto delle pratiche musicali. Al fine di ricostruire un quadro complessivo delle ricadute performative, a una panoramica sul repertorio delle singole tipologie di strumento virtuale, che verrà ricostruito in dettaglio nel database dell'appendice al presente capitolo, seguirà l'analisi specifica di una scelta di strumenti-interfacce, per verificarne in dettaglio le potenzialità esecutive.

2.2 Gli strumenti virtuali: dall'imitazione, estensione e ibridazione del reale alla generazione dell'astratto

Le tecniche di modellizzazione, descritte nel capitolo I, hanno testimoniato la possibilità di creare un'ampia e assai variegata tipologia di modelli fisici: dall'imitazione dello strumento acustico alla costruzione di oggetti del tutto trascendenti la dimensione del reale. La peculiare natura di ciascun modello scaturisce dalla rappresentazione selettiva della realtà che, di volta in volta, sta alla base del processo formalizzazione. Così, sebbene, il processo di modellizzazione possa essere idealmente utilizzato per qualsivoglia tipologia di modello, nell'applicazione pratica, le peculiarità progettuali che contraddistinguono le diverse tecniche consentono di produrre modelli, e, di conseguenza, strumenti, del tutto differenti.

Nell'ambito dell'imitazione più proprio della PM, alcune tecniche hanno facilitato la simulazione di oscillatori autosostenibili – come, ad esempio, gli archi, i fiati e, in generale, gli strumenti che producono suono solo durante l'iniezione di energia –, mentre altre, invece, sono risultate più efficaci nel modellizzare 'oscillatori transienti', quali le percussioni o le corde pizzicate, che continuano a suonare anche dopo essere stati eccitati. In particolare, come già visto nel capitolo I, le guide d'onda modellizzano strumenti quali le corde ad arco, gli strumenti a fiato, gli ottoni; l'algoritmo di Hiller e Ruiz, invece, le corde pizzicate o percosse; l'algoritmo MSW le corde sfregate, l'algoritmo KS le corde pizzicate, il PhISEM gli strumenti a percussione.

Nel dominio più specifico della PBM – ad eccezione della sintesi modale e dell'approccio d'interazione di massa, che sono modulari – la maggior parte delle tecniche di modellizzazione crea oggetti/strumenti sonori simulati dal mondo reale, i quali, una volta progettati, pur non potendo essere modificati né in parte, né in toto, si rivelano – in particolare quelli che utilizzano la sintesi per guide d'onda digitali – compatti, efficienti e idonei all'ampliamento timbrico di uno strumento esistente, pur nel mantenimento delle caratteristiche sonore sue proprie.¹⁴ Le potenzialità della sintesi

¹⁴ Esemplificativo a tal proposito, il percorso dell'implementazione delle tecniche a guida d'onda, rese popolari dal loro utilizzo, nel 1994, dal primo prodotto commerciale basato sulla sintesi di modellizzazione fisica: lo strumento elettronico a tastiera della Yamaha, e in seguito impiegate anche nei sintetizzatori MIDI, sulle schede audio per personal computer e, infine, pure su software commerciali che applicano uno o più metodi di modellizzazione fisica.

modale e dei sistemi massa-molla consistono, invece, nella loro capacità di progettare moduli vibranti liberamente riconfigurabili, esplorata, in particolare, in ambienti quali Modalys e Genesis (§ 1.3.3.1, 1.3.2.1), che sollevano il musicista dalle necessità della programmazione, limitandosi, quest'ultimo, a specificare unicamente i sistemi fisici che consistono di elementi meccanici, acustici o elettrici collegati tra di loro.

L'approccio modale risulta più flessibile del paradigma massa-molla, in virtù della modularità delle sottostrutture vibranti, come i ponti e le tavole, che si possono aggiungere o sottrarre, per creare effetti di sintesi variabili nel tempo, come, ad esempio, l' 'espansione' o il 'restringimento' della dimensione di uno strumento. Il metodo permette anche interpolazioni timbriche da uno strumento all'altro, combinando sottostrutture in maniera innaturale. Le unità di base di un sistema meccanico massa-molla consentono, invece, un più alto livello di astrazione nella progettazione degli strumenti, in quanto, l'atomizzazione elementare, alla base del formalismo, permette la creazione di qualsiasi sistema vibrante immaginabile, concettualizzando la realtà sonora in termini più generali e arrivando a 'costruire' strumenti del tutto astratti. Così, la sintesi modale facilita la creazione di strutture ibride, le cui identità sonore derivano dalle proprietà dei moduli amalgamati, mentre l'approccio massa-molla eccelle nella creazione delle forme vibranti più astratte, che emergono dall'interazione fluida, senza alcuna strutturazione gerarchica di tutti i parametri musicali, compresa la strumentazione, la composizione, l'esecuzione e la spazializzazione.¹⁵

Da quanto emerso in precedenza, è possibile individuare diverse modalità di rappresentazione degli oggetti produttori di suono, le quali, nel loro insieme, testimoniano una progressiva decostruzione dello strumento acustico, fino alla più sottile parcellizzazione della materia in atomi che, proprio in virtù di tale frantumazione, consente di produrre la costruzione dell'astratto, per la generazione di realtà altre:¹⁶ se, infatti, l'imitazione presuppone la rappresentazione dello strumento reale nella sua interezza secondo una modularità che descrive, ad esempio, nella tecnica per guide d'onda, il meccanismo del risonatore, l'ibridazione implica la rappresentazione dell'oggetto a vari livelli di decomposizione in cui eccitatori e risonatori possono

¹⁵ NICOLAS CASTAGNÉ – CLAUDE CADOZ, *Creating Music by Means of 'Physical Thinking': The Musician Oriented Genesis Environment in Digital Audio Effects (DAFX-02)*, Hamburg 2002, pp. 169-174.

¹⁶ Cfr. GIANPAOLO BORIN – GIOVANNI DE POLI – AUGUSTO SARTI, *Algorithms and Structures for Synthesis Using Physical Models*, cit.

mescolarsi liberamente, mentre l'astrazione, infine, presuppone un percorso di progettazione che si costituisce nella rappresentazione di particelle elementari di materia.

Il processo di una progressiva disarticolazione dello strumento, sopra descritto, trova riscontro, sul piano del risultato sonoro, nella classificazione in strumenti estesi, ibridi e astratti, proposta, nel 2007, da Juraj Kojs, Stefania Serafin e Chris Chafe, la quale mette in rilievo la relazione tra il risultato timbrico ottenuto e la natura dell'oggetto modellizzato, in un'ottica di progressivo allontanamento dalla rappresentazione degli strumenti esistenti [tab. 2.1].¹⁷

Tipologia di strumento	Oggetto modellizzato	Risultato timbrico
1. Esteso	Strumento od oggetto sonoro esistente	Estensione dei parametri dello strumento
2. Ibrido	Due o più strumenti esistenti o eccitatori	Fusione di differenti strumenti e modalità di produzione sonora
3. Astratto	Strumenti od oggetti sonori astratti	Fusione di agenti fisici di produzione sonora

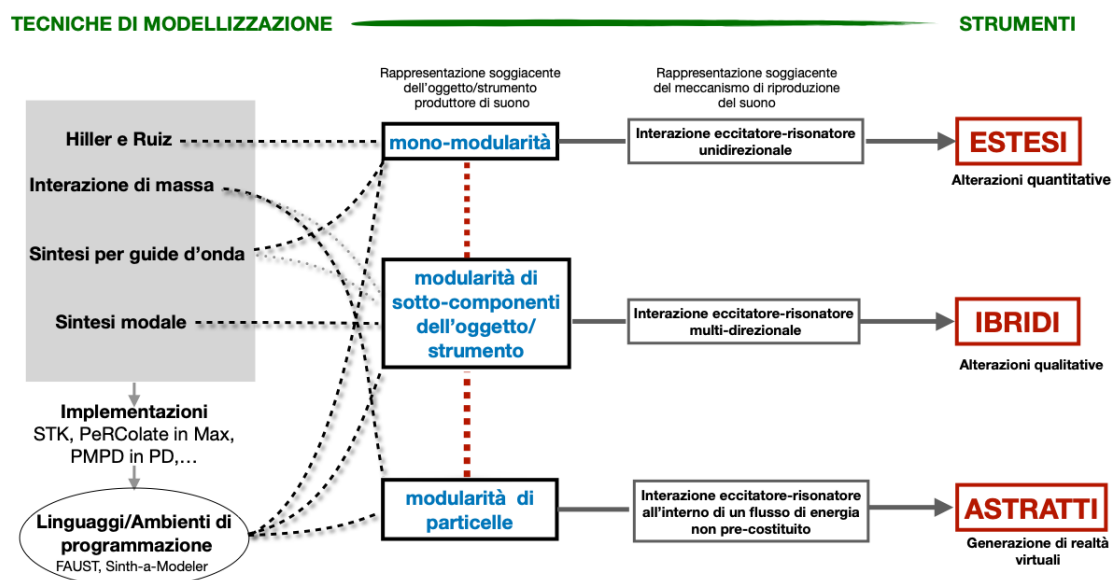
Tab. 2.1: *Classificazione degli strumenti virtuali (da JURAJ KOJS – STEFANIA SERAFIN – CHRIS CHAFE, Cyberinstruments via Physical Modeling Synthesis: Compositional Applications, p. 62).*

Gli strumenti estesi sono simulazioni di strumenti esistenti dotate della capacità di estendere i parametri al di là dei limiti della loro costituzione fisica. La costruzione di una corda virtuale, ad esempio, consente l'incremento della sua lunghezza, del suo spessore oppure la transizione continua tra materiali diversi, al di là delle limitazioni del mondo fisico. Gli strumenti ibridi consistono, invece, nella fusione delle proprietà di due o più strumenti esistenti, ad esempio la combinazione di flauto e chitarra (§ 2.1, 2.2), mentre gli strumenti astratti, pur essendo ispirati a leggi fisiche, non hanno equivalenti nel mondo fisico, come, ad esempio, il *triangle* di Cadoz (§. 2.2.2.1).

Partendo dall'osservazione di Smith, che aveva sottolineato quanto la comprensione dei modelli nasca dall'osservazione dei meccanismi di produzione della

¹⁷ Cfr. JURAJ KOJS – STEFANIA SERAFIN – CHRIS CHAFE, *Cyberinstruments via Physical Modeling Synthesis* cit.

pratica musicale – la cui complessità costituisce, al tempo stesso, uno stimolo ed un modello cui tendere, per poter procedere, poi, alla ‘distorsione creativa’ (§ 1.3.4) – è possibile interpretare le tre tipologie sopra descritte come livelli ulteriori di concettualizzazione della realtà, che procedono dal primo livello dell’imitazione.



Tab. 2.2 Generalizzazione della relazione tra la natura del modello e la natura dello strumento virtuale. Le linee tratteggiate di diverso spessore rappresentano la relazione tendenziale tra le tecniche di sintesi e la rappresentazione del modello: maggiore lo spessore della linea, maggiore la relazione elettiva che si instaura tra i due termini.

La tabella 2.2 è il risultato di uno sforzo di rappresentazione concettuale volto a ricostruire un percorso generale, che renda trasparente il legame instauratosi tra la concettualizzazione che sta alla base della rappresentazione del modello e il suo farsi strumento, all’interno di un processo complessivo di sgretolamento dell’identità strumentale e della sua ricostituzione secondo paradigmi altri: dai modelli che simulano i meccanismi del mondo fisico, ai modelli del tutto decostruiti nelle loro componenti e ricostruiti in moduli assemblati arbitrariamente – sebbene ancora all’interno del paradigma eccitatore-risonatore –, fino all’elaborazione di modelli fondati sull’atomizzazione della materia, in funzione di un ritorno a una dimensione fisica elementare di trasduzione di energia tra le componenti di sistemi astratti. Nel contesto di tale ricostruzione, mentre gli strumenti estesi, come già osservato, sono spesso modellizzati con la sintesi a guida d’onda, la sintesi modale è risultata più naturalmente efficace nella simulazione di strumenti ibridi – sebbene non manchino esempi di progetti

di tale tipologia con guide d'onda digitali (§ 2.2.1) –, mentre l'approccio d'interazione di massa, transcendendo l'idea di strumento tradizionale, nell'ottica di un oggetto/fenomeno produttore di suono, facilita la progettazione di strumenti astratti: strumenti tutti utilizzati in maniera efficace in ambito compositivo per la fondazione di una nuova liuteria virtuale.

Ne consegue che, nella trattazione diffusa degli strumenti virtuali, si è scelto di trattare insieme gli strumenti estesi ed ibridi (§ 2.2.1) poiché accomunati, seppur secondo differenti modalità, da un condiviso ancoraggio al mondo fisico, riservando, invece, un apposito paragrafo allo studio di quelli astratti, data la loro natura del tutto altra rispetto alla fisicità del mondo reale (§ 2.2.2).

2.2.1 Processi di trasformazione del reale: gli strumenti virtuali, estesi e ibridi

Nel dominio del virtuale, il sistema di produzione del suono reale viene ad essere rappresentato mediante i meccanismi di interazione tra eccitatore (per esempio arco, dito o respiro) e risonatore (per esempio corde accoppiate con ponticelli e casse armoniche). Ne consegue che le repliche estese di tali meccanismi derivano, prima, dalla comprensione dei processi che si osservano nel mondo fisico (ad esempio pizzicare una corda, suonare una campana, ecc.), e, poi, dalla loro successiva 'amplificazione' e 'aumentazione', in virtù della quale le dimensioni e le proprietà dei materiali possono esorbitare quantitativamente i limiti del mondo fisico stesso, sebbene la consueta relazione unidirezionale eccitatore-risonatore rimanga intatta: pizzicare un modello di corda lunga quanto i cavi di sostegno del Golden Gate Bridge è un esempio di strumento virtuale esteso, come, analogamente, un esempio di strumento virtuale esteso è quello utilizzato in *Corda di Metallo* (1997) di Michelangelo Lupone. Nel brano, l'algoritmo di Hiller e Ruiz, rielaborato da Marco Palumbi e Lorenzo Seno, è stato utilizzato per modellizzare una corda di strumento ad arco – uno dei primi esempi di applicazione di tale metodo, in campo artistico, per modificare i parametri di costruzione della corda – al fine di creare nuove e inconsuete articolazioni gestuali (§ 2.2.1.1, 3.5.1). Nel suo lavoro successivo *Canto di Madre* (1998) – «una riflessione sul sacro nella musica elettronica e sulle tematiche mariane» – il compositore ha miscelato i suoni di tale modello con

campioni vocali, mettendo in relazione i materiali sonori della corda virtuale con il canto e la voce naturale. Lo stesso modello è impiegato in *Linea fugace* (2015), per computer, di cui è il sottotitolo stesso – *tre variazioni sulla corda virtuale* – a rivelarne la materia compositiva.

L'algoritmo di McIntyre, Schumacher e Woodhouse, incentrato sull'esame dettagliato del comportamento dei suoni nel dominio del tempo, seppur dispendioso da un punto di vista computazionale, risulta particolarmente efficace per un'accurata simulazione dell'interazione tra la corda e l'arco poiché tiene conto della dimensione dell'arco medesimo: due punti situati ai lati esterni dell'arco definiscono, infatti, i confini della sua lunghezza. Tale algoritmo è stato implementato, in particolare, da Chafe nel Celletto (§ 2.2.1.2), un'interfaccia che gli ha consentito di estendere le proprietà timbriche dello strumento fisico.¹⁸

L'algoritmo Karplus-Strong e la sua versione estesa si è già visto costituire una delle tecniche più efficaci per la simulazione delle corde pizzicate e delle percussioni, in applicazioni in tempo reale, come testimonia l'utilizzo da parte di Jaffe, che ha usato la tecnica per l'estensione delle possibilità timbriche delle corde pizzicate – pur senza comprometterne l'identità sonora – nelle seguenti composizioni: *May All Your Children Be Acrobats* (1981), *Silicon Valley Breakdown* (1982), *Telegram to the President* (1984), *Grass* (1987) e *Racing Against Time* (2001), così come in altri pezzi. *May All Your Children Be Acrobats* è un brano per otto chitarre, soprano e nastro generato dal computer, strutturato in un dialogo tra corde fisiche e chitarre virtuali. I suoni di corde pizzicate ottenuti sono riconoscibili per il loro aspetto a volte molto metallico, ma in altri momenti molto vicino ai suoni delle chitarre acustiche.¹⁹ L'algoritmo Karplus-Strong nella versione estesa dall'autore e da Julius O. Smith III è stato utilizzato in *Grass* (1987)²⁰ per coro femminile e nastro generato dal computer. Anche in questo brano il pizzicato oscilla tra gli estremi costituiti, da un lato, da sonorità metalliche e percussive, e, dall'altro, da

¹⁸ Cfr. CHAFE, *Simulating Performance on a Bowed Instrument*, in *Current Directions in Computer Music*, a cura di Max Mathews, MIT Press Cambridge, MA 1989, pp. 185-198.

¹⁹ Il brano è stato commissionato ed eseguito per la prima volta nel 1980 da David Starobin e dal Purchase Guitar Ensemble. Il testo è tratto da *The People, YES* di Carl Sandburg.

²⁰ *Grass* affronta la tematica della guarigione dalle ferite di guerra. Il brano è stato commissionato per il coro dello Skidmore College Chorus. Il pezzo si basa sulla poesia *Grass* di Carl Sandburg, ed è stato eseguito sul sintetizzatore digitale Systems Concepts Digital Synthesizer presso il CCRMA dell'Università di Stanford nel 1987.

sonorità naturali, soffermandosi su di una pluralità di stadi intermedi. La parte elettroacustica utilizza anche una rete di riverbero a guida d'onda variabile in tempo reale, creata da Smith. Nel 1990, Charlie Sullivan, allora studente della Princeton University, sviluppò alcune estensioni dell'algoritmo Karplus-Strong per simulare una chitarra elettrica con distorsione e feedback.²¹ Tale modello è stato utilizzato da Paul Lansky in *Things She Carried* (1997),²² che ha pure impiegato lo *slide-flute* di Perry Coock (§2.2.1.4) in *Still Time* (1993-1994).²³

La sintesi a guida d'onda rappresenta la tecnica più utilizzata per l'elaborazione di strumenti estesi, poiché simulando modelli fissi, i parametri di controllo possono essere facilmente utilizzati per estendere le capacità degli oggetti modellati. In generale, sistemi con spettri quasi-armonici sono adatti ad essere modellizzati da guide d'onda monodimensionali, mentre sistemi con spettri inarmonici sono modellizzati più efficacemente con reti di guida d'onda 2D e 3D (§1.3.4). Le guide d'onda monodimensionali sono state utilizzate per modellizzare tipologie di strumenti diversi quali, ad esempio, i tratti vocali, gli strumenti ad arco e a fiato, il pianoforte, e i tubi sonori corrugati. Gli oggetti con un numero limitato di componenti inarmoniche, come – ad esempio, le barre di percussione, la sega musicale, la ciotola tibetana e l'armonica a bicchieri vengono modellizzati utilizzando 'guide d'onda a bande'.

Achim Bornhoeft ha impiegato un modello a guida d'onda di una corda pizzicata nel suo brano *Virtual String* (1997), per tape. Al fine di permettere la manipolazione della tensione della corda, della rigidità, dello smorzamento, del tipo e posizione dell'eccitazione, della posizione virtuale del pickup e della risposta in frequenza, la corda virtuale è stata implementata nella *vstring* dell'interfaccia grafica utente. Il risultato fa sì che suoni di corde simulate con misure fisiche e comportamenti innaturali espandano lo spazio sonoro, che rimane pur tuttavia ancorato alle sonorità dello strumento originale:

With it's acoustic manifestations of non-existing objects *Virtual string* musically describes the border between an abstract and concrete form of sound perception. The software used

²¹ CHARLES R. SULLIVAN, *Extending the Karplus Strong Algorithm to Synthesize Electric Guitar Timbres with Distortion and Feedback*, «Computer Music Journal», XIV (1990), pp. 26-37.

²² JON APPLETON, *Things She Carried* (review), «Computer Music Journal», XXV (2001), pp. 85-86.

²³ Alcune implementazioni di Synthesis Toolkit (STK) a guida d'onda digitale possono essere ascoltate nel CD *Music Box* del 2006 di Paul Lansky (producer Robert J. Starobin, Bridge 9210).

for this piece ("vstring") offers a graphical interface to a physical model of a string. Although this was never intended to be a compositional tool, the very intuitive approach to the different parameters of the model was my inspiration to make a piece with it.²⁴

Modelli a guida d'onda di tubi e corde (con Yamaha VL70-m) sono stati impiegati da Bernd Lintermann (grafica) e Torsten Belschner (suono) in *SonoMorphis*, installazione 3D interattiva del 1998 (§ 2.2.1.6). Attraverso un approccio cross-modale, Belschner ha ottenuto un sensibile ampliamento delle identità strumentali. I materiali visivi, le forme e il posizionamento spaziale degli oggetti sono, infatti, mappati al timbro e al pitch degli strumenti estesi.

A partire dal 1997, Juan Reyes ha utilizzato modelli digitali a guida d'onda in diverse composizioni: *Straw-berri* (1997), per tape, *Wadi Musa* (2001), per clarinetto modellizzato, *ppP* (2001), per pianoforte modellizzato, *Freddie the Friedlander* (2004), per archi modellizzati e *Fuxing* (2006), per modelli fisici a *banded waveguide* di marimba e vibrafoni suonati con l'arco, e modelli spettrali di Pipa and Gamelan). In *Straw-berri*²⁵, vengono modellizzati il flauto e le corde pizzicate di strumenti ad arco:

This is an algorithmic and media - alone piece composed for physical modeling of the flute and plucked sounds. The contrast is the will of an artist who talks and sings spontaneously along the background. The source of materials (i.e vectors) were obtained by balancing the wave equation of the flute close to the end of 1996. These are used for stretching the modeled string of the plucked sound and thereby portraying the state of mind of an engineer. Straw translates little whistles in spanish. The piece also pretends to create an image of a walking flutist on a circle back and forth.²⁶

ppP (2000)²⁷ è stato composto utilizzando il modello fisico del pianoforte sviluppato in Common Lisp Music, da Scott Van Duyne al CCRMA. La composizione è basata sul dialogo tra un pianoforte modellizzato e un pianoforte acustico tradizionale. Il titolo sta per

²⁴ ACHIM BORNHOEFF, *Virtual String program note*, in <<http://www.sumtone.com/prog-note.php?workid=128>> (accesso 13-01-2021).

²⁵ Il brano è realizzato in Common Music e Common Lisp Music. I suoni utilizzati sono stati ottenuti sia mediante la sintesi a guida d'onda, sia mediante l'elaborazione del segnale digitale. I gruppi sonori sono stati ordinati per mezzo di funzioni in Common Music.

²⁶ CCRMA STANFORD WEBSITE, *nota su Straw-berri* (1997), con registrazione audio, in <<https://ccrma.stanford.edu/~juanig/descrips/strawberri.html>> (accesso 10-01-2021).

²⁷ *ppP* fu eseguito per la prima volta nel 2001 alla Campbell Recital Hall della Stanford University con Ching-Wen Chao al pianoforte.

pianoforte perfettamente intonato o perfettamente percepito, ma potrebbe anche significare pianissimo, sebbene non in accezione dinamica. L'uso del modello fisico consente al compositore di sperimentare sonorità difficili da ottenere con strumenti reali: le corde possono estendersi all'infinito ed essere accordate secondo temperamenti diversi come, ad esempio, la scala di Pierce Bohlen,²⁸ come pure esprimere una medesima altezza attraverso lunghezze e densità diverse della corda. Inoltre, il contesto in cui sono inserite le corde può essere mutato: esse, infatti, possono essere eccitate indipendentemente dall'essere percosse da un martelletto, come pure risuonare indipendentemente da una tavola armonica.

Nella versione per installazione museale, la struttura di *ppP* consiste di cinque interventi del pianista ciascuno dei quali, a loro volta, fanno parte di un ciclo. Il ciclo è formato da cinque gruppi di file audio che suonano contemporaneamente, ma con durata diversa. Ogni file audio contiene una sola classe di altezze. File sonori diversi sono variazioni della classe di altezze scelta. Tutte le classi di intonazione della scala temperata vengono utilizzate e ad ogni gruppo sonoro sono assegnate due o tre classi di altezze. Il gruppo, costituito da una sola classe di altezze, suona in un determinato momento, di solito in modo casuale o secondo una sequenza predefinita. In questo caso i raggruppamenti possono essere in fase o fuori fase. Questa versione deve essere eseguita dal vivo con un pianista e un sistema audio. Le sorgenti possono essere costituite sia dalla riproduzione diretta del suono su disco rigido, per ottenere una rigorosa casualità sia da cinque lettori CD, ciascuno con la propria sequenza di compact disc, in sincronia tra di loro.²⁹

Chris Chafe, utilizzando la modellizzazione a guida d'onda di Perry Cook ha, a sua volta, esplorato le sonorità della tromba virtuale, in *El Zorro*, una composizione del 1991 basata sull'improvvisazione. Assieme a Greg Niemeyer nel 2001, ha progettato *Oxygen Flute*, un ambiente interattivo di computer music in tempo reale, che modella, attraverso le tecniche a guida d'onda, quattro flauti cinesi di bambù, di 9.000 anni fa, provenienti dai siti archeologici di Jiahu (§ 2.2.1.5). Sempre assieme a Greg Niemeyer,

²⁸ *Current Directions in Computer Music Research*, a cura di Max Mathews e John R. Pierce, MIT Press, Cambridge, MA 1991, p. 167.

²⁹ Cfr. JUAN REYES, *Nota di sala su ppP*, in <<https://www.fondation-langlois.org/html/e/oeu.php?NumEnregOeu=o00002307>> (accesso 10-01-2021).

nello stesso anno, in *Ping* vengono modellizzate delle corde virtuali che si espandono e si contraggono in modo parametrico a seguito della trasmissione di dati temporali su internet.³⁰ L'eccitazione delle corde è data dalle connessioni internet che si ricreano continuamente tra le varie sedi fisiche di cui è costituita l'installazione. *Ping* funziona come un rilevatore sonoro i cui echi 'suonano' i percorsi attraversati dai dati che fluiscono sulla rete. In un dato momento, diversi siti che costituiscono l'installazione sono contemporaneamente attivi, e i suoni che si sentono rendono udibile il ritardo temporale che si verifica mentre si spostano le informazioni da un sito all'altro tra i computer collegati in rete. La mappatura di questi contatti internet con gli strumenti virtuali definisce lo spazio sonoro esteso del compositore.

Matthew Burtner utilizza modelli a guida d'onda, progettati da Stefania Serafin,³¹ in *S-Trance-S* (2001), in *S-Morphe-S* (2002), in *That Which is Bodiless is Reflected in Bodies* (2004). In *S-Trance-S*, per meta-sax ed electronica, in *S-Morphe-S* e in *Windsketches* (2005) vengono sperimentate le implementazioni di un controller analogico strumentale alternativo, il meta-sax, per espandere le possibilità timbriche dei modelli fisici di una corda d'arco e di una campana tibetana virtuale. In particolare, in *S-Trance-S*, l'identità del modello virtuale viene distorta ed espansa attraverso la gestualità dello strumento di controllo, creando, all'interno della composizione, una mescolanza delle sonorità del sassofono acustico con quelle della corda virtuale (§ 2.2.1.7, 3.2).

In *S-Morphe-S* il segnale del sassofono viene usato come impulso di una campana tibetana modellata fisicamente, col risultato di ottenere uno strumento che possiede le peculiarità articolatorie di un sassofono soprano, come, ad esempio, il 'click' dei tasti, il respiro, i trilli e i toni sostenuti, con il corpo risonante di una campana tibetana la cui

³⁰ «Ping is a site-specific sound installation that is an outgrowth of audio networking research at Stanford University's Center for Computer Research in Music and Acoustics and interactive and graphic design experiments originating from the Stanford University Digital Art Center. Ping is a sonic adaptation of a network tool commonly used for timing data transmission over the Internet. As installed in the outdoor atrium of SFMOMA». CCRMA STANFORD WEBSITE, *nota su Ping*, in <<https://ccrma.stanford.edu/~cc/pub/txthtml/ping.html>>. (accesso 10-01-2021).

³¹ STEFANIA SERAFIN, *The Sound of Friction: Real-Time Models, Playability and Musical Applications*, Ph.D. Thesis, Stanford University, 2004; CHAFE, *Simulating Performance on a Bowed Instrument* cit.; SMITH III, *Techniques for Digital Filter Design and System Identification with Application to the Violin*, Ph.D. Thesis, Stanford University 1983; SERAFIN – CARR WILKERSON – SMITH III, *Modeling Bowl Resonators Using Circular Waveguide Networks*, in *Proceedings of the 5th International Conference on Digital Audio Effects (DAFX-02)*, Hamburg 2002, pp. 1-5; GEORG ESSL – SERAFIN – PERRY COOK – SMITH III, *Musical Applications of Banded Waveguides*, «Computer Music Journal» XXVIII (2004) pp. 51-63.

forma e proprietà del materiale muta in tempo reale, creando un corpo in continua metamorfosi. Il titolo evoca, infatti, la trasformazione disincarnata a cui allude la parola greca richiamando esplicitamente l'immagine di corpi e di forme disincarnate in continua trasformazione.

In *Windsketches* per meta-sax, strumento ad arco e modello fisico del vento, il metasax guida le turbolenze dell'aria, scolpendo le superfici che si creano dall'interscambio con le sonorità acustiche. *That Which is Bodiless is Reflected in Bodies*, per campana tibetana e suono generato al computer a 8 canali, fu composto per la *Rotunda Dome Room* dell'Università della Virginia, immaginata come una gigantesca campana tibetana invertita. Il brano, che inizia e termina con un percussionista che suona una campana tibetana reale, esplora il fenomeno dei battimenti caratteristici dello strumento, che, nel modello virtuale, si estende ad una moltitudine di variazioni spettrali e di ritmi. Quest'ultima risuonando dalle casse acustiche, con il pubblico collocato in mezzo alla sala, muta continuamente forma e dimensione con la pulsazione creando una sempre nuova 'danzante re-incarnazione' dello spazio virtuale, e sperimentando, in tal modo, la distorsione, l'impulso polimetrico e la sua stessa trasformazione strutturale (§ 2.1.8, 3.3).

Ted Coffey ha utilizzato la modellizzazione fisica di un'armonica a bicchieri in diversi brani, tra i quali *Armonica Lullabies* (2004), per nastro a due canali e *Koans* (2004), per suono generato dal computer e video con testo, violoncello, piante, acqua e diapason. In *Armonica Lullabies*, il compositore ha creato uno spazio sonoro virtuale in cui lo strumento cibernetico estende le proprietà timbriche dell'armonica:

Then I went back to my own world. Georg Essl, a colleague in the SoundLab at Princeton University, had developed a [mathematical/computer] physical model of a finger on glass, written in C++. A professor of mine, Dan Trueman, had already ported [translated] another of Essl's physical models (as if you bowed vibraphone bars with a violin bow) to C, for use in the popular music programming language Max/MSP. I modified that port and began to play with my new armonica object [in MSP]. I could change certain parameters over time, such as finger pressure, resonance and vibrato. I used this new 'instrument' to render textures of long tones and several lullabies, including Scottish and early American lullabies.³²

³² Essl, *Physical Wave Propagation Modeling for Real-Time Synthesis of Natural Sound*, Ph.D. thesis, Princeton University, 2002 pp. 94-97.

Juraj Kojs ha composto una nutrita serie di opere con modelli a guida d'onda quali *Garden of the Dragon* (2003), *Three Movements* (2004), *Air* (2006), *Concealed* (2006), *En Una Noche Oscura* (2006), *In Secret* (2006) e *To Where He Waited* (2006). Si tratta di musiche, come ammesso dall'autore stesso, 'basate sull'azione', in cui è l'azione meccanica a motivare la creazione di tutti gli aspetti della composizione, compresa la sua concezione, la forma, la strumentazione, il design strumentale, l'esecuzione e la partitura stessa. La sintesi per modelli fisici è chiamata a strutturare l'imitazione e l'estensione delle fonti sonore esistenti, trasponendo tale musica basata sull'azione nel mondo virtuale. Kojs impiega sia strumenti musicali, sia oggetti d'uso quotidiano e anche giocattoli musicali quali, ad esempio, tubi sonori, corde d'arco, fujara, campane tibetane, bowed bar, flauti e 2D mesh (§ 3.5.2).

Un'ulteriore categoria di strumenti estesi è rappresentata dagli strumenti a percussione che implicano il movimento e la collisione di particelle, modellizzati mediante la tecnica del PhISEM. Attraverso l'applicazione dei principi stocastici di collisione di particelle, infatti, sono stati modellizzati sia strumenti 'agitatori' quali, ad esempio, la maraca, il sekere e la cabasa, sia strumenti concussivi con un gran numero di particelle e di frequenze di risonanza come il tamburello e i campanelli da slitta. L'estensione delle limitazioni del modo fisico è qui resa possibile dal controllo di diversi parametri del modello significativi dal punto di vista psicoacustico, quali il numero di oggetti in collisione, le proprietà di smorzamento, o la frequenza di risonanza.

Nella sua composizione *Wadi Musa* (2001) per quenás (flauti andini), violoncello, modello di guida d'onda per clarinetto e modelli stocastici di maracas, Juan Reyes,³³ muovendosi nell'ottica della sintesi fisicamente informata, implementa il controllo *espressivo* dello strumento virtuale attraverso la modificazione dei valori dei parametri specificamente selezionati: nel settaggio del modello di maraca utilizzato, ad esempio, se i parametri dell'intonazione e della frequenza sono assenti, la durata si rivela, invece, essere il fattore nevralgico per conferire espressività alla sintesi del suono.

³³ JUAN REYES, *Composing for the Physical Model of the Maraca*, in
<<https://ccrma.stanford.edu/~juanig/articles/wadi-icmc/wadi-icmc.html>> (accesso 05-01-2021).

The model of the maracas proved to be a great tool for achieving a variety of creative goals in pursuing a new music composition. Basic parameters such as note duration and dynamic range produce a wide range of material and perhaps a new aesthetic in the perception of computer generated music.³⁴

Nello specifico, i parametri energetici del sistema, la quantità di moto e le condizioni al contorno sono tutti parametri che modellizzano la gestualità della performance, descritta dalle leggi della fisica che governano i movimenti del corpo umano e la tensione muscolare, condizioni tutte che contribuiscono all'eccitazione delle vibrazioni che provengono dalle componenti dello strumento produttrici del suono. L'espressività negli strumenti a percussione consiste, infatti, nella capacità di eccitare o toccare gli oggetti (risposta tattile), con altri oggetti secondo modalità differenti.³⁵ Così, Il programma di modellizzazione dell'espressione che si interfaccia con l'algoritmo PhISEM, che risiede in un file di partitura con tempi, durate e direzioni, esegue, in tal senso, dei *gesti musicali*.

In *Wadi Musa*, il modello delle maracas instaura una dialettica contrastiva con gli esecutori dal vivo, creando pattern e suoni diversi che mutano continuamente il timbro durante tutta la composizione, ottenendo diverse sfumature di maracas come pure di cabasa, guiro, tamburello e campane a vento. In tali sonorità, i poliritmi sono il risultato di combinazioni caotiche tra le durate, il tasso di scuotimento, la quantità di particelle e le risonanze del guscio.

Dan Trueman ha utilizzato i modelli PhISEM di Cook in *Lobster Quadrille* (1999), modellizzando delle campane a vento di bambù controllate con il sistema *Bow-Sensor-Speaker-Array* (BoSSA). Il controller, un «deconstructed violin reconstructed»³⁶ come definito dall'autore stesso, consiste di un diffusore sferico, di un archetto con dei sensori che ne mappano posizione, pressione e velocità, di una tastiera di ebano dotata di sensori e di un set di sensori a forma di ponticello eccitati dall'archetto. In *Lobster Quadrille* vengono utilizzate alcune semplici mappature, che guidano processi di elaborazione del suono, e attraverso degli accelerometri applicati all'R-Bow, che stimano

³⁴ *Ibidem*.

³⁵ BILL VERPLANK – MAX MATHEWS – ROBERT SHAW, *Scanned Synthesis*, in *Proceedings of the International Computer Music Conference*, Berlin 2000 [4 pp.].

³⁶ DAN TRUEMAN – PERRY R. COOK, *BoSSA: The Deconstructed Violin Reconstructed*, «Journal of New Music Research», XXIX (1999), pp. 121-130.

posizione e angolazione dell'arco, viene pilotato un modello di campane a vento, in modo da far sì che il musicista possa scuotere direttamente le campane. Il medesimo modello è utilizzato in *Wind in Hands, Water in Feet* per danzatori ed elettronica, in cui i timbri strumentali sono stati estesi per simulare sonorità simili all'acqua. I performer, dotati di sensori (accelerometri) ai piedi, attivano lo strumento interagendo con l'acqua 'cibernetica'. Il compositore aumenta così lo spazio timbrico del bambù trasformandolo nelle sonorità del fluire dell'acqua.³⁷

Juraj Kojš in *Revelations* per giocattoli circolari, piatti ed elettronica, estende le possibilità sonore dei giocattoli fisici attraverso la loro modellizzazione PhISM, sviluppata da Perry Cook, e un modello fisico della barra di percussione ad arco sviluppato da quest'ultimo assieme a Georg Essl, implementati in ambienti Max/MSP. Per controllare i modelli virtuali di maracas, guiro e campane di bambù, vengono utilizzate superballs di plastica, biglie di vetro e *metal Bocci balls*, creando, così, delle strutture ibride analogico-digitali di risonanza che sono il risultato della combinazione dell'eccitazione fisica di raschiamento e del riverbero degli strumenti virtuali. Gli esecutori sono impegnati nel far rimbalzare, rotolare e raschiare i giocattoli circolari contro i piatti in plexiglas, plastica lucida e opaca, alluminio e ottone al fine di eccitare *cyber-shaker* di maraca, cabasa e guiro dalla forma irrealistica. Per integrare le azioni di raschiamento di una palla di gomma fisica contro superfici dure sono anche impiegate la barra virtuale di percussioni sfregata e la corda virtuale sfregata. In generale, nel brano, gli strumenti virtuali contribuiscono all'estensione timbrica e temporale dei gesti di raschiamento a decadimento rapido del piatto fisico, in particolare di quello di plastica (§ .2.2.1.1, 3.4.2).

Se l'ampia casistica sopra discussa testimonia le grandi potenzialità manipolatorie degli strumenti virtuali estesi, una più radicale distorsione e allontanamento dalle categorie del reale è messa in atto dagli strumenti ibridi, caratterizzati dalla fusione di più strumenti, o parti di essi, all'interno di un'unica struttura la cui dominanza timbrica emerge dal differente allineamento parametrico delle sue componenti. Ne consegue che, mentre le tecniche di modellizzazione degli strumenti estesi consentono la replica

³⁷ Cfr. TRUEMAN, *Comunicazione personale dell'autore*, in KOJŠ – SERAFIN – CHAFE, *Cyberinstruments via Physical Modeling Synthesis* cit. p. 64.

e l'espansione parametrica dei meccanismi di produzione del suono – proponendo, comunque, interazioni di tipo unidirezionale tra il performer e il suo strumento congruenti col mondo fisico –, nella realtà ibrida, il paradigma eccitatore-risonatore, interpretabile mediante blocchi modulari collegati in reti seriali e parallele, può essere analizzato e riconfigurato invertendo le funzioni dei suoi componenti, e reinterpretando, in tal modo, il fare musica oltre l'ambito del mondo fisico.

Così, sebbene il paradigma eccitatore-risonatore venga mantenuto, è possibile introdurre all'interno di un sistema ibrido un accoppiamento non abbinato nel mondo fisico – come avviene, ad esempio nel pizzicare la membrana di un tamburo –, o, ancora, possono essere organizzati degli eccitatori e dei risonatori multipli per formare reti di interazioni ibride e strumenti con un flusso di energia multidirezionale, come specificato da Kojs:

Hybrid interactions are indeed characterised by the qualitative alterations in energy flow and type, and such interactions can be controlled directly in the computer environments such as Modalys, Tassman, Genesis, Max/Msp and Pure Data. In real-time performances, the musicians use substitute controllers to operate the hybrid instruments.³⁸

Se, dunque, suonare gli strumenti estesi implica che li si ecciti fisicamente consentendo, così, l'attuarsi di esplorazioni timbriche e materiche, mediante alterazioni di tipo quantitativo, la natura della realtà ibrida risiede, invece, in alterazioni qualitative, del flusso e del tipo di energia, frutto di relazioni reciproche tra il performer e lo strumento, e nell'esplorazione di feedback multimodali all'interno degli spazi di simulazione, che contribuiscono a realizzare una nuova acustica dotata di timbri esistenti esclusivamente nello spazio virtuale: mentre, infatti, pizzicare la corda con il plettro è un'interazione congruente con il mondo fisico, pizzicare il plettro è un esempio di modalità ibrida, all'interno di una realtà non solo simulata ed espansa, ma del tutto manipolata e reinventata.

Un caso del tutto particolare è rappresentato dall'uso di strumenti acustici con la funzione di controller, come ad esempio il metasax, usato da Burtner, attraverso il quale

³⁸ KOJS, *Virtual Reality and Sonic Cyberspaces: Augmentation, Hybridisation and Abstraction*, «International Journal of Arts and Technology», VI (2013), pp. 167-180: 173.

si creano delle tecniche estese per i modelli fisici che non sarebbero possibili per lo strumento reale. Lo spazio timbrico del modello fisico *ExBow bowed string* è controllato dal meta-sassofono (§ 2.2.1, 2.2.1.7): le pressioni applicate ai tasti dello strumento acustico agiscono, infatti, come controlli individuali di input per il modello fisico. Assegnando ogni tasto del sassofono a un diverso parametro del modello, si crea una riallocazione dei parametri di un'azione espressiva complessa, l'arco, ad un'altra azione complessa, la diteggiatura dei tasti. Di conseguenza, diventano possibili azioni dell'arco impossibili, come la rapida fluttuazione della posizione di quest'ultimo mentre si applica una pressione estrema.³⁹ La natura disincarnata dei modelli fisici diventa, così, un mezzo per ricombinare tali strumenti con altre interfacce, creando la possibilità di concepire strumenti elettroacustici ibridi potenzialmente illimitati, dalle articolazioni timbrico-gestuali del tutto nuove.

Rimanendo, invece, all'interno di sistemi totalmente virtuali, le interazioni tipiche della natura ibrida sono state controllate direttamente negli ambienti informatici come Modalys, Tassman, Genesis, Max/Msp, Pure Data fino alle più recenti implementazioni in ambienti di più facile uso e immediatezza. Sebbene non manchino, dunque, esempi di simulazione di strumenti ibridi con le guide d'onda digitali e con le reti massa-molla, la sintesi modale è, però, quella specificatamente predisposta per tale tipologia di simulazione, sia a livello dei controlli, sia a livello della costruzione stessa di nuove strutture strumentali. In particolare, la modularità, caratteristica precipua della sintesi modale, permette l'utilizzo di sotto-componenti interagenti, ma autonome, per la costruzione del modello. Inoltre, grazie all'omogeneità di rappresentazione di tutte le strutture vibranti del modello, è possibile aggiungere o sottrarre tali sottostrutture per creare effetti di sintesi variabili nel tempo, come l'espansione o il restringimento della dimensione di uno strumento, al fine di simularne il cambiamento durante la performance (§ 1.3.3.1).

Nel 1999, Hans Tutschku in *Eikasia*, per nastro a 8 canali, ha utilizzato strumenti virtuali ibridi, creati con la sintesi modale, utilizzando specificatamente il software Modalys.⁴⁰ Con l'obiettivo di raggiungere una complessità sonora equivalente all'uso di altre più consolidate tecniche di sintesi, il compositore fonde dinamicamente diverse

³⁹ BURTNER – SERAFIN, *The Exbow MetaSax* cit., p. 139.

⁴⁰ Cfr. HANS TUTSCHKU, *Portfolio of Compositions*, Ph.D. thesis, The University of Birmingham 2003.

piastre, circolari e rettangolari, con distinte caratteristiche spettrali e le eccita in base ai dati di analisi delle corde gravi del pianoforte (§ 3.4). La combinazione parametrica e l'oscillazione tra i diversi modelli 'parentali' hanno portato alla creazione di piastre virtuali ibride, che emergono dagli 'stati intermedi':

The idea in Eikasia was very simple. The easiest objects to obtain are strings and plates. The whole piece deals with plates tuned to spring spectra, and strings tuned to plate spectra. I mixed analysis and synthesis. I analyzed low piano strings with very rich spectra and tuned all the vibrating modes of circular and rectangular plates to the spectrum of the piano and vice versa.⁴¹

Il trattamento dell'ibridazione come un processo biologico di combinazione di elementi correlati in nuove forme ha ispirato *E-clip-sing* (2008) per clarinetto amplificato, chitarra, violoncello, contrabbasso ed elettronica di Kojis. La composizione, facendo metaforicamente riferimento agli incroci biologici del genere orchidea, fonde elementi musicali, strumenti e azioni performative. In particolare, l'autore ha esplorato azioni esecutive che non sono native degli strumenti, come pizzicare il violoncello, e, così facendo, ha prodotto timbri originali (si veda la descrizione dettagliata al paragrafo 2.3.1).

Pur non essendo frequente la progettazione di strumenti virtuali ibridi mediante la sintesi per guida d'onda, che combina l'eccitazione di uno strumento con il risonatore di un altro, non mancano composizioni che ne sperimentano l'uso, quali *Air Study I* (2002) di Scavone che prevede l'implementazione di due modelli fisici virtuali di 'corde soffiate' e un sassofonista dal vivo. Il brano consiste nell'esplorazione di sottili effetti di overblowing attraverso l'uso di algoritmi creati e controllati usando il Synthesis ToolKit. Il sassofonista diteggia un si bemolle basso per l'intero pezzo, creando variazioni di tono/timbro completamente controllate dall'imboccatura e dalle modificazioni della cavità orale. La parte su nastro è stata generata mantenendo indipendenti le due corde virtuali, ognuno delle quali assegnata a una singola traccia stereo. Sono stati creati, così, effetti di fase mediante leggere variazioni nei tassi di vibrato e nelle altezze, mentre gli

⁴¹ KETTY NEZ, *An Interview with Hans Tutschku*, «Computer Music Journal», XXVII (2003), pp. 14-26: 17.

effetti di overblowing sono stati controllati tramite i parametri di pressione dell'ancia e del respiro.⁴²

Nel contesto dell'improvvisazione, un esempio ulteriore di strumento ibrido è costituito dall'implementazione del *blotar* in Max/Msp, utilizzato da Dan Trueman, che combina le proprietà del flauto e dei modelli di chitarra elettrica di Charles Sullivan, grazie alla possibilità di controllare i parametri necessari per passare da comportamenti più simili al flauto a comportamenti più simili alla chitarra elettrica:⁴³

While “morphing” between the instruments is challenging (the *blotar* is a remarkably difficult instrument to control and perform), it is possible to create moments where the instrument seems to be having an identity crisis, or, more accurately, the listener may hear features of both the flute and the electric guitar simultaneously.⁴⁴

A conclusione di questa parte del capitolo, converrà evidenziare la maggiore rilevanza quantitativa degli strumenti estesi rispetto a quelli ibridi dovuta alla loro facilità d'uso, così come alla compattezza dei modelli, per non parlare della maggiore vicinanza con l'oggetto reale simulato. Ciò si riflette, specularmente, nel numero dei casi trattati negli approfondimenti susseguenti in cui si è analizzato, per ciascun strumento, la relazione tra la natura del modello, le potenzialità performative e la contestualizzazione nell'ambito compositivo, dati che sono stati schematizzati nella tabella riassuntiva [tab. 2.3]. Vista la fluidità e l'eterogeneità di molti dei casi studiati la denominazione dello strumento può essere stata mutuata da fonti diverse: dall'algoritmo stesso, dal titolo dell'opera, oppure dalla denominazione dell'interfaccia utilizzata nella performance.

⁴² Cfr. KOJS – SERAFIN, *Augmenting Sonic Reality. Cyberinstruments Designed with Digital Waveguides*, «Digital Creativity» XIX (2008), pp. 77-90.

⁴³ KOJS – SERAFIN – CHAFE, *Cyberinstruments via Physical Modeling Synthesis* cit.

⁴⁴ VAN STIEFEL – DAN TRUEMAN – COOK, *Re-coupling: the uBlotar Synthesis Instrument and the sHowl Speaker-Feedback Controller*, in *Proceedings of the 2004 International Computer Music Conference (ICMC 2004)*, Miami 2004, par. 2.1, [9 pp.].

Denominazione	Modello fisico	Interfaccia	Tipologia di strumento
Corda Di Metallo [opera]	sistema arco-corda (algoritmo Hiller e Ruiz sviluppato da Seno-Palumbi)	implementazione del modello in C su piattaforma Pentium	esteso
Celletto [interfaccia]	sistema arco-corda (algoritmo di MSW); sistema arco-corda con tratto vocale	<i>Celletto</i> : strumento/controller (Chafe, Mattheus)	esteso
Corde pizzicate [modello fisico]	corda pizzicata (algoritmo esteso Karplus-Strong)	sintesi su <i>Systems Concept Digital Synthesizer</i> controllata da una macchina FOONLY F-4.	esteso
Whirlwind [modello fisico]	HosePlayer + Clarinet + Slide-Flute (a guida d'onda)	interfaccia grafica su NeXT via (MIDI); HIRN Meta-Wind Instrument Controller (Cook); <i>Buchala Lightning Controller</i> ; Interfaccia di controllo in Max/MSP	esteso
Oxygen Flute [installazione 3D]	flauti di bambù cinesi archeologici (a guida d'onda)	dispositivo LICOR per sensore continuo di Co2 in ambiente STK	esteso
Sonomorphis [opera audio-video]	Yamaha VL70-m, sintesi per guida d'onda	interfaccia MIDI e due Apple Macintosh per il controllo del suono.	esteso
Exbow-Metasax [modello fisico/interfaccia]	corda d'arco	meta-sassofono, dati di controllo MIDI in ambiente Max/MSP	esteso
Singing Bowl [modello fisico]	modello fisico multimodale di campana tibetana	interfaccia in ambiente Max/MSP	esteso
Maraca [modello fisico]	maraca (afuche, sekere, cabasa...) trascrizione diretta dell'algoritmo STK in <i>Common Lisp Music</i> (CLM)	interfaccia in ambiente CLM	esteso
Windchimes Rbow [modello fisico/interfaccia]	campane a vento di bambù (STK in ambiente Max/Msp)	<i>Bowed-Sensor-Speaker-Array</i> (BoSSA) dotato di <i>Rbow</i> .	esteso
Cyber-Shakers [modelli fisici]	maraca, campane di bambù e guiro, <i>cyber-bar</i> ad arco (libreria PerRColate) e sistema arco-corda	superballs di plastica, biglie di vetro e palline di metallo Bocci (<i>Patang</i>) in ambiente Max/MSP	esteso
Buiara [opera]	struttura ibrida: sistemi seriali di plettri + plettri; sistemi seriali di mazzuole + mazzuole; gesti/strumenti ibridi (pizzicare un piatto con il plettro)	M-Audio Axiom MIDI keyboard in ambiente Tassman	ibrido
Psychopsis [opera]	struttura ibrida: un singolo eccitatore per vari risonatori in parallelo (travi, membrane e	M-Audio Axiom MIDI keyboard in ambiente Tassman	ibrido

	piastre) che incrociano parti aggiuntive		
<i>Odontocidium</i> [opera]	struttura ibrida a rete, multidirezionale (pletri, mazzuole, corda, marimba)	M-Audio Axiom MIDI keyboard in ambiente Tassman	ibrido

Tab.2.3 Tabella riassuntiva degli strumenti analizzati in 2.2.1.

2.2.1.1 Corda di Metallo

Corda di metallo (1997) di Michelangelo Lupone – per quartetto d’archi, nastro magnetico e dispositivo di spazializzazione⁴⁵ – propone la modellizzazione di una corda pizzicata, percossa e sfregata da un archetto. L’approccio, elaborato da Marco Palumbi e Lorenzo Seno, come sviluppo del metodo delle differenze finite di Hiller e Ruiz, consiste nell’integrazione diretta del moto di tutta la corda a partire da una sua espressione continua nello spazio. Anche se computazionalmente più pesante rispetto, ad esempio, alle guide d’onda, il sistema permette di variare qualsiasi parametro fisico durante il processo stesso di esecuzione, ottenendo così effetti particolari ed inediti dal punto di vista musicale (§ 1.3.1).⁴⁶

In *Spazio, arco e metallo*, l’autore ha spiegato nel dettaglio le finalità e le fasi del suo lavoro, svolto in équipe al CRM (Centro Ricerche Musicali) di Roma, da cui si evince che, in primo luogo, si è proceduto allo studio del meccanismo di eccitazione, cui ha fatto

⁴⁵ Eseguita dal Kronos Quartet, Teatro Olimpico, Roma 1997. Al momento non è disponibile una registrazione pubblica completa del brano. Qualche frammento poteva ascoltarsi nel sito www.acustica.org, attualmente rimosso. La partitura non è pubblicata. Una copia del manoscritto è conservata alla Biblioteca della Scuola di Musica di Fiesole (collocazione: F.NOVECENTO.LUPONE.01).

⁴⁶ «The novelty in the string equation we used is a partial third-order derivative mixed term describing the internal friction of the string, which is responsible of the frequency-dependent damping in actual strings. The free-motion analytic solutions of the corresponding PDE is discussed, together to the numerical integration method developed (based on a combination of the sinus transform, and of the well-known Stoermer rule), whose results are analysed from a timbre point of view. We also show a short comparison with Waveguides, and future improvements to continuously varying bowing point and left-hand finger position, and to reduce both asymptotic and actual computational complexity». MARCO PALUMBI, LORENZO SENO, *Physical Modeling by Directly Solving Wave PDE*, in *Proceedings of the 1999 International Computer Music Conference*, Beijing, 1999 [4 pp.].

seguito l'implementazione del sistema – soprattutto attraverso lo studio del comportamento dell'archetto –, e, infine, l'applicazione delle funzioni di controllo.⁴⁷

La funzione di eccitazione – in rapporto al meccanismo di funzionamento dell'archetto, da cui derivano principalmente le caratteristiche timbriche degli strumenti ad arco – è stata particolarmente sviluppata secondo le seguenti modalità: corda pizzicata; corda martellata; corda tirata con l'archetto. Quest'ultima tipologia di eccitazione ha permesso di introdurre un termine non lineare nell'equazione del moto, che rappresenta l'interazione reale che esiste tra il sistema eccitazione (arco) e le variabili di stato della corda eccitata. Poiché l'arco costituisce un modo di impartire energia alla corda, il sistema corda-archetto considera, in questo caso, due stati:

1. *Stick*: la corda è incollata all'archetto, e la segue;
2. *Slip*: l'archetto strofina sulla corda, e gli impartisce un attrito di tipo viscoso, proporzionale alla velocità relativa e alla pressione.

La fase di implementazione del sistema si è conclusa dopo diverse sperimentazioni che hanno implicato lo studio del comportamento dell'archetto in relazione a due aspetti:

1. La colofonia, una resina dal comportamento complesso fortemente dipendente dalla temperatura, che varia secondo il coefficiente d'attrito il cui comportamento termico è stato modellizzato attraverso l'impiego di soglie.

2. Il rumore di sfregamento modellizzato aggiungendo alla funzione di eccitazione del rumore bianco di semi dispersione che ha permesso di rendere l'intensità del rumore proporzionale alla pressione dell'arco e di introdurre una componente aleatoria che, tramite l'archetto, è responsabile dei comportamenti microcaotici della corda.

Dopo aver implementato il modello, Lupone e la sua équipe hanno applicato le funzioni di controllo a tutti i termini dell'equazione, mettendo in atto una duplice strategia volta, da un lato, alla realizzazione del nastro magnetico con i soli vincoli di coerenza dettati dall'ordinamento dei materiali sonori previsti dalla partitura dell'opera e, dall'altro, partendo dalle modalità d'emissione usate dagli strumenti reali, al controllo dei vincoli fisici imposti dall'operatività strumentale. In *Corda di Metallo*, le funzioni

⁴⁷ Cfr. MICHELANGELO LUPONE, *Spazio, arco e metallo*, in *Musica tecnologia interazioni*, «Quaderni della Civica Scuola di Musica», XIV (1999), pp. 80-89.

selezionate per il controllo vengono applicate ai seguenti parametri del modello fisico [fig. 2.1]:

- tensione delle corde (lunghezza);
- smorzamento interno;
- smorzamento dell'aria;
- velocità dell'arco;
- pressione dell'arco;
- posizione dell'arco.

Come risultato dell'implementazione di tali parametri di controllo, *Corda di metallo* permette al compositore sia di utilizzare i gesti usuali dello strumentista ad arco, sia di consentire gesti esecutivi altri, al di fuori della gamma dei parametri fisicamente possibili.⁴⁸

Relativamente ai gesti usuali dello strumentista, l'archetto, ad esempio, può essere premuto sulla corda con maggiore o minore forza e/o velocità, può essere poggiato su punti diversi (più al tasto o più al ponte), può scegliere quale nota emettere. Relativamente ai gesti altri, che esorbitano dalle scelte consuete, si può, ad esempio, scegliere il tipo di corda (gomma, budello, acciaio, acciaio ideale, con tutte le gradazioni intermedie), la tipologia di mezzo acustico in cui quest'ultima agisce (vuoto, elio, aria, acqua, olio, ecc.), e decidere pure la 'ruvidità' dell'archetto.

⁴⁸ LORENZO SENO, *La sintesi del suono*, in <<http://www.acustica.org/ex-mnt/sintesi/archetto.htm>> (accesso 20-12-2020.)

Categoria A Tipo 2 pag.1				
DT 0.01	Nota (20=Re0)	lunghezza Base 0.041714	Amp. bianco 0.1	Durata (s) 13
Smorz			Rampa	
Min		0.01	Vfin	0
Max		0.01	Durata	13
Periodo iniziale		1.000		
Periodo finale		1.000	Sweep	13
Duty Cycle		100%		
Gain per sat		1	Periodo	13
Pressione			Rampa	
Min		2	Vfin	0
Max		2	Durata	13
Periodo iniziale		1.000		
Periodo finale		1.000	Sweep	13
Duty Cycle		50%		
Gain per sat		5	Periodo	13
Velocità			Rampa	
Min		0.01	Vfin	0
Max		5	Durata	13
Periodo iniziale		7		
Periodo finale		7	Sweep	13
Duty Cycle		75%		
Gain per sat		5	Periodo	13
Smorz. Interno			Rampa	
Min		0.051	Vfin	0
Max		0.051	Durata	13
Periodo iniziale		1.000		
Periodo finale		1.000	Sweep	13
Duty Cycle		50%		
Gain per sat		1	Periodo	13
Lunghezza			Rampa	
Periodo iniziale		8	Vfin	3%
Periodo finale		8	Durata	13
Ampiezza		3.00%	Sweep	13
Duty Cycle		50.00%	Periodo	13
Gain per sat		1.2		
Volume			2500	
Posizione			Rampa	
Min		0	Vfin	0
Max		7	Durata	13
			Periodo	13

Fig. 2.1 Partitura per la generazione del suono sintetico (da LUPONE, Spazio, arco e metallo, p. 87).

Oltre a poter scegliere tutti questi parametri, esiste anche la possibilità di variarli con continuità nel corso dell'esecuzione: è possibile, ad esempio, glissare non solo le altezze, ma anche il materiale costitutivo della corda, col risultato di poter far evolvere tutti i parametri secondo modalità precluse a qualsiasi strumentista, il quale non potrebbe mai eseguirli con la stessa velocità, ampiezza e precisione.⁴⁹

The model has been used with "impossible articulations" not only in the sense that sounds with parameter variations timings that can't be performed by humans have been produced,

⁴⁹ SENO, *Lo strumento virtuale. Implicazioni teoriche e pratiche nell'uso dei modelli fisici*, Intervento al Convegno *La Terra Fertile*, L'Aquila, settembre 1998, in <<http://www.acustica.org/publicat.htm>> (accesso 20-12-2020).

but also in the extended meaning that parameters, which are physically unreachable, like f.i. internal friction, have been varied during sound emission.⁵⁰

Riguardo le peculiarità dell'opera, come testimoniato dall'autore stesso, l'elemento distintivo è costituito dall'emergenza timbrica del metallo:

Per l'uso più strettamente correlato all'opera, in particolare agli attributi timbrici del metallo, ho utilizzato il modello privato della cassa armonica. Ho potuto esaminare la corda durante le variazioni del suo smorzamento interno che caratterizzano il materiale costruttivo; ho fissato le curve formantiche e ho sperimentato sugli strumenti reali, opportunamente filtrati dei contributi della cassa, le condizioni di altezza e di emissione del suono che avrebbero potuto garantirmi l'emergenza timbrica del metallo. Sugli strumenti reali ho distinto cinque punti di intervento per l'archetto: posizione al ponte, ponte-centro, centro, centro-tastiera, tastiera. Le posizioni dell'arco vengono interpolate con diverse velocità e associate ad altezze sensibili a questa variazione [fig. 2.2 – 2.3].⁵¹

- bridge (P);
- centre-bridge (PC);
- centre (C);
- centre-fingerboard (TC);
- fingerboard (T).

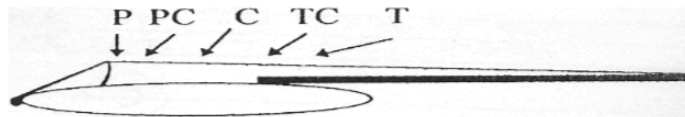


Fig. 2.2 Posizioni dell'arco in Corda di Metallo (da WALTER CIANCUSI, Michelangelo Lupone: "Corda di Metallo", 1997, s.n.p.).

⁵⁰ PALUMBI – SENO, *Physical Modelling of Bowed Strings – a New Model and Algorithm*, in <http://www.acustica.org/metal_string.htm> (accesso 20-12-2020).

⁵¹ MICHELANGELO LUPONE, *Spazio, arco e metallo* cit., p: 86.

The image displays a musical score for a string quartet, specifically for the piece 'Corda di Metallo'. It consists of four staves, each representing a different instrument: Violino I (Vno I), Violino II (Vno II), Viola (Vla), and Violoncello (Vc). The score is organized into five measures, each labeled with a number in a box at the top: 3, 2, 4, 5, and 5. Each measure contains complex musical notation, including notes, rests, and various dynamic markings such as *p*, *f*, *pp*, and *mf*. There are also performance instructions like 'S.V.' (Sordina Violino) and 'C' (Corda). The notation includes slurs, accents, and other musical symbols typical of a detailed score.

Fig. 2. 3 Estratto della partitura di Corda di Metallo, Posizioni dell'arco, p. 3.

L'algoritmo *Corda di metallo* è utilizzato, sempre da Lupone, anche in *Canto di madre*,⁵² che modella l'andamento espressivo della voce naturale della performer Silvia Schiavoni consentendone la trasformazione e l'integrazione con altri materiali sonori di origine sintetica in un percorso di metamorfosi, in virtù del quale, dal suono della corda virtuale, si giunge ad una voce virtuale e, da quest'ultima, al canto della parola «madre» intonato da una voce naturale. L'inizio del brano è caratterizzato dalla presentazione di una successione di suoni di riferimento che costituisce una sorta di guida per l'ascolto,

⁵² Il brano è stato realizzato nei laboratori dell'Istituto Gramma de L'Aquila e del Centro Ricerche Musicali di Roma, nel periodo settembre-ottobre 1998. Cfr. *Scheda relativa all'opera Canto di madre*, probabilmente redatta dall'autore stesso, nel website della Federazione CEMAT (Centri Musicali Attrezzati). A conoscenza di chi scrive non sono disponibili altre fonti su tale opera.
<<http://www.federazionecemat.it/index.php?id=5.4&lg=it&pag=opera&wh=142>> (accesso 20-12-2020).

poiché il profilo d'altezza e timbrico di questa successione deriva dall'integrazione della corda e della voce naturale:

La corda si rende emergente a partire da questa successione e con progressive trasformazioni si trasforma in una voce sintetica la cui evoluzione sonora è tesa a costruire la parola. La tensione verso la parola esaspera il suono sintetico, ne modula tutti i parametri fino alla sua metamorfosi in voce naturale, quest'ultima si svela in modo univoco alla fine del brano con la parola "madre".⁵³

Il compositore, dunque, partendo da un modello astratto, matematico, della voce naturale integra l'algoritmo corda di metallo con diversi gradi di trasformazione – dalla corda virtuale, alla voce virtuale –, fino al costituirsi di una voce sintetica, la quale divenendo sempre più simile a quella 'naturale', giunge ad articolare la parola.

2.2.1.2 Celletto

Il *celletto* è un violoncello elettronico creato da Chris Chafe, che sfrutta le possibilità della modellizzazione del sistema arco-corda dell'algoritmo di McIntyre, Schumacher e Woodhouse, per estendere le proprietà timbriche dello strumento fisico.⁵⁴ La tecnica di sintesi adottata, pur impegnativa dal punto di vista dell'intensità di calcolo, risulta essere particolarmente efficace per la simulazione più accurata dell'interazione tra l'arco e la corda, dato che tiene conto della dimensione dell'arco, definita da due punti situati ai lati estremi dello stesso, che ne tracciano i confini. Lo strumento/controller è costituito da un blocco di legno di acero intagliato, con una tastiera tradizionale su cui sono impiantate quattro corde analogiche. Quest'ultimo ha quattro uscite audio che corrispondono alle quattro corde, oltre ad una quinta uscita costituita dalle quattro corde sommate, ottenute inserendo un pick-up piezo-ceramico sotto ciascuna corda.⁵⁵

⁵³ *Scheda relativa all'opera* Canto di madre cit.

⁵⁴ Il *Celletto* è descritto in CHAFE, *Simulating Performance on a Bowed Instrument* cit.

⁵⁵ «One of the earliest examples of an experimental bowed string instrument is Max Mathew's electric violin, which used a piezo-ceramic bimorph pickup system to capture the vibrations of the strings. The same pickup technology was used on Chris Chafe's *Celletto*, which he began building in 1988. The *Celletto* is an ongoing and pioneering project, and has evolved through a series of embodiments in many performances. Along the way, various sensors have been used to capture the gestures of playing, such as

Il sintetizzatore controlla cinque parametri: la lunghezza delle corde; la velocità dell'arco; la pressione; la posizione di contatto; lo smorzamento della corda.

I pickup della corda e l'elettronica, incorporati nel *celletto*, sono stati progettati da Mathews insieme ad un sistema per tradurre il movimento dell'arco in MIDI – il *Lightning* della Buchla Associates, costruito con l'aiuto di Jay Kadis – che utilizza un accelerometro e un estensimetro. Si tratta di un rilevatore a infrarossi che traccia la posizione del tallone dell'arco sul piano verticale, una posizione agevole da rilevare poiché, essendo il violoncellista posizionato in modo stabile, sia l'arco, sia lo strumento risultano essere sempre visibili da un punto fisso davanti all'esecutore. Pitch e ampiezza sono tracciati e convertiti in comandi MIDI con il *Period Predictor Pitch Tracker* (PPPT) introdotto da Perry Cook nel 1991.⁵⁶

I began with a block of maple and carved the celletto seeking my way into all the fun keyboard players were having with live MIDI-based computer synthesis. It turned out to be a much more in-depth project as sophisticated audio computing and software synthesis became available. It has remained a work-in-progress as sensing, synthesis and processing continue to develop. As a performer, it's my platform for engaging the capabilities of computers which are still to come.⁵⁷

Push Pull (1995),⁵⁸ per *celletto* e live electronics, costituisce un esempio di composizione elettronica interattiva, in cui Chafe intende usare il *celletto* per la sintesi in tempo reale, attraverso un settaggio per lo strumento aumentato in cui il computer diviene parte del performer.⁵⁹

strain gauge sensors and an accelerometer on the cello bow». CORNELIUS POEPEL – OVERHOLT, *Recent Developments in Violin-related Digital Musical Instruments: Where Are We and Where Are We Going?*, in *Proceedings of the 2006 International Conference on New Interfaces for Musical Expression* (NIME06), Paris 2006, pp. 390-395: 391.

⁵⁶ Cfr. Cook, *Identification and Control of Parameters in an Articulatory Vocal Tract Model, with Applications to the Synthesis of Singing*, Ph.D. Thesis, Stanford University 1991.

⁵⁷ Nota dell'autore <<https://chrischafe.net/portfolio/celletto-pieces/>> (accesso 03-01-2021).

⁵⁸ L'opera è stata composta nel 1995 con il supporto della National Endowment for the Arts Fellowship. Il brano è stato registrato in *Arco Logic* CD, Centaur Records, 2001.

⁵⁹ Cfr. *CRRMA Overview*, Aprile 2000, Report n. STAN-M-106, pp. 1-66: 17-18 <<https://ccrma.stanford.edu/files/papers/stanm106.pdf>> (accesso 03-01-2021).

When Chris plays the *celletto*, he's controlling the algorithms in the computer accompaniment with his feet or with the position of his bow. You could say he's steering a bunch of other, not too smart players that live inside the computer.⁶⁰

I gesti strumentali si estendono musicalmente e vivono di vita propria, entrando in dialogo con le trame musicali che si evolvono. La combinazione dei parametri di input del modello fisico è stata impiegata per riprodurre i diversi colpi d'arco, quali lo staccato, il legato e lo spiccato. Ispirandosi idealmente a *Repons* di Pierre Boulez, come testimoniato dall'autore stesso, le trasformazioni elettroniche dei suoni dei solisti includono: la dimensione temporale; il pitch-shifting; la modulazione dell'uno nell'altro e il rapido movimento spaziale. L'uso da parte di Chafe di equazioni dinamiche non lineari, per ottenere modelli musicali con variazioni imprevedibili e dal suono naturale, risponde al tentativo di ottenere risposte particolarmente realistiche.

In *Transect* (1999),⁶¹ Chafe accoppia il *celletto* con un modello fisico del tratto vocale. I suoni vengono prodotti utilizzando un modello fisico che simula una corda ad arco che eccita un tratto vocale: «ingredients of lines, articulations and phrasing were created by playing the synthesizer with a synthetic player whose bow arm loosely mimics the physics of the real thing». ⁶² Tale combinazione dei due modelli, essendo essenzialmente lineare, non può essere, però, considerata uno *strumento ibrido*, poiché il suono non è il risultato di un'interazione dinamica, bensì del prodotto dell'eccitazione del *celletto* che sostituisce la glottide del tratto vocale.⁶³

⁶⁰ *Stanford University News Service* del 15-1-1997,

<<https://news.stanford.edu/pr/97/970115chafeprof.html>> (accesso 03-01-2021).

⁶¹ La registrazione del brano è disponibile in <<https://ccrma.stanford.edu/~cc/pub/wav/transect.wav>> (accesso 03/01/2021); Una nota dell'autore sul brano può leggersi in <<https://chrischafe.net/transect/>> (accesso 03/01/2021).

⁶² *CRRMA Overview*, Aprile 2000, Report n. STAN-M-106, pp.1-66: 17, in. <<https://ccrma.stanford.edu/files/papers/stanm106.pdf>> (accesso 03-01-2021).

⁶³ Cfr. KOJS – SERAFIN – CHAFE, *Cyberinstruments via Physical Modeling Synthesis: Compositional Applications* cit., p. 65, nota 12.



Fig. 2.4 Chris Chafe al celletto.

2.2.1.3 Corde virtuali pizzicate

David Jaffe utilizza l'algoritmo esteso Karplus-Strong nella sua composizione *Silicon Valley Breakdown*, per una sinfonia di corde pizzicate virtuali, a quattro canali, generate dal computer, scritta al CCRMA della Stanford University in collaborazione con Julius Smith e presentata, in prima assoluta, alla Biennale di Venezia del 1982.⁶⁴ Lo strumento virtuale, derivante dalla modellizzazione dei cavi del *Golden Gate Bridge*, descrive strumenti che vanno dall'acuto del mandolino piccolo fino al basso profondissimo.⁶⁵ Tale

⁶⁴ Dalla sua prima apparizione alla Biennale di Venezia del 1983, *Silicon Valley Breakdown* è stato presentato in oltre venti paesi dei cinque continenti. Jacques Lonchamp di *Le Monde* lo ha salutato come un punto di riferimento della computer music. Cfr. JACQUES LONCHAMPT, *Jouer de l'ordinateur à la Biennale de Venise*, *Le Monde* del 05-10-1982. Una nota dell'autore sul brano può leggersi in <<https://www.davidajaffe.com/music/silicon-valley-breakdown>> (accesso 04-01-2021). Una registrazione stereo del 1982 è contenuta nel CD, *XXIst Century Mandolin*, Well-Tempered Productions.

⁶⁵ Cfr. <<https://www.davidajaffe.com/music/silicon-valley-breakdown>> (accesso 04/01/2021) che contiene un film del 1984 di George Olczak, in cui Jaffe discute la realizzazione di *Silicon Valley*

orchestra è, spesso, suddivisa, nel corso del brano, in quattro gruppi più piccoli, ciascuno dei quali dotato di proprie qualità timbriche, di specifiche caratteristiche e di una precisa collocazione all'interno dello spazio quadrifonico.⁶⁶

Il punto di partenza di questo lavoro è la tradizione folkloristica americana del *blue-grass*, il cui genere musicale viene assunto come modello di riferimento a diversi livelli compositivi. In primo luogo, ne viene mutuata la tipologia dell'organico strumentale, trasposta, ovviamente, sul piano digitale. In secondo luogo, la relazione con il genere folklorico viene alimentata mediante la citazione del brano tradizionale *Shenandoah Valley Breakdown*, impiegato come nucleo generativo di una serie di variazioni melodiche. Infine, il *blue-grass* si costituisce come modello di riferimento per la dimensione ritmica, che, grazie all'utilizzo del computer, viene amplificata a tal punto da prevedere delle velocità esecutive ben oltre i limiti delle possibilità umane, che conferiscono al brano un carattere vitalistico esasperato, a sua volta studiata amplificazione della vitalità ritmica tipica del *blue-grass* tradizionale.

Tale composizione dimostra una serie di possibilità compositive consentite dall'implementazione dell'algoritmo Karplus-Strong: oltre alle note 'troppo veloci' per essere suonate da un esecutore umano, cui si è già alluso, sono possibili complesse ed intricate strutture temporali come i canoni del tempo sinusoidale – in cui le parti iniziano insieme, divergono nel tempo e arrivano, poi, alla perfetta sincronizzazione –, la continua modificazione del timbro delle corde simulate – che dimostra le potenzialità della variazione dei parametri nel modello – e, infine, gli strumenti immaginari, impossibili da realizzare nel mondo reale, come, ad esempio, la riproduzione sonora del pizzicato degli archi ottenuto dai cavi di supporto del *Golden Gate Bridge*:

Once you have that, now you can abstract it and it still retains its identity. I imagined the idea of plucking the cables of the Golden Gate Bridge. Having finished the 8-guitar piece (*May All Your Children Be Acrobats*), I decided to create a tour de force for the new

Breakdown, e una conferenza dal titolo *The Making of Silicon Valley Breakdown*, presentata all'Università di Victoria, in Canada, il 6 Novembre, 2013, nel contesto dell'Orion Visitor Residency 2013.

⁶⁶ Cfr. DAVID JAFFE, *Extensions to the Karplus-Strong Plucked String Algorithms*, «Computer Music Journal», VII (1983), pp. 56-69.

technique. That eventually led to the creation of *Silicon Valley Breakdown*, a twenty-minute virtuoso piece for computer alone.⁶⁷

2.2.1.4 Whirlwind e HIRL

Nel 1992, Perry Cook, in *A Meta-Wind-Instrument Physical Model, and a Meta-Controller for Real-Time Performance Control*, presentò la possibilità di costruire uno strumento a guida d'onda che simulasse i principali meccanismi acustici dell'intera famiglia di strumenti a fiato, permettendo così allo strumento di funzionare come un flauto traverso, un flauto dolce, un clarinetto, un sassofono, una tromba, un trombone e altri strumenti ibridi delle varie sottofamiglie di strumenti a fiato.⁶⁸

Once the basic physics of an instrument or instrument family are understood, a computational model can be derived, and that model can be simplified for more efficient computation. Optimization often takes advantage of the idiosyncrasies of specialized DSP hardware.⁶⁹

Perry Cook, dopo aver sviluppato vari strumenti a guida d'onda, quali *HosePlayer*, il *Clarinet* e lo *Slide-Flute*, facendone una serie di interfacce grafiche, fuse questi tre modelli nel *Whirlwind*.⁷⁰ Tale modello, sviluppato a partire dai tre modelli che descrivono gli strumenti ad ancia singola, labiale e a getto d'aria, permetteva la simulazione non solo di queste tre categorie di strumenti, ma anche di strumenti ibridi. I parametri di controllo del *Whirlwind* sono costituiti dalla rigidità della canna, dalla tensione del labbro, dalla lunghezza del tubo e della linea laterale, dalla condizione del foro, dalla lunghezza del

⁶⁷ Intervista a David Jaffe del 17-01-2017, in <<https://musicguy247.typepad.com/my-blog/2017/01/david-a-jaffe-interview-electronic-music-composer-pioneer-software-developer-next-computers-silicon-valley-breakdown-1.html>> (accesso 04/01/2021).

⁶⁸ «Once the basic physics of an instrument or instrument family are understood, a computational model can be derived, and that model can be simplified for more efficient computation. Optimization often takes advantage of the idiosyncrasies of specialized DSP hardware». COOK, *A Meta-Wind-Instrument Physical Model, and a Meta-Controller for Real-Time Performance Control*, in *Proceedings of the International Computer Music Association*, 1992, pp. 273-276: 273.

⁶⁹ *Ivi*, p. 272.

⁷⁰ Cfr. COOK, *Recently Completed Work* (1995), in <<https://www.cs.princeton.edu/~prc/RecentWork.html>> (accesso 05-01-2021).

getto, dalla pressione del respiro, e da un coefficiente di ibridazione tra il tipo di clarinetto e il tipo di flauto/registratore trasversale.

Il controllo di questi metodi di sintesi è condotto con i medesimi controlli meccanici peculiari dello strumento acustico, che permette, infatti, al musicista di suonare utilizzando i paradigmi della maggior parte degli strumenti a fiato, fornendo contemporaneamente anche altre specifiche modalità di utilizzo. I parametri del modello possono essere controllati sia con un'interfaccia grafica su NeXT, sia via MIDI, con l'HIRN *Meta-Wind Instrument Controller*,⁷¹ il controller polimorfo sviluppato da Perry Cook che permette di 'suonare' e di controllare in tempo reale i modelli fisici del clarinetto, del sassofono soprano, del flauto, della tromba e pure il passaggio dall'uno all'altro. L'HIRN dispone di numerosi sensori e di una struttura variabile che si adatta alle modalità di esecuzione dei diversi strumenti: la mano destra può essere fatta scorrere linearmente lungo l'asse dello strumento, così come ruotata radialmente, al pari della mano sinistra. La testa dell'apparecchio può essere ruotata, mentre i sensori nel boccaglio rilevano la pressione dell'aria iniettata, la pressione esercitata sulla canna, la tensione delle labbra e anche il pitch, permettendo, così, di poter cantare nello strumento. Infine, le dita azionano otto tasti di controllo direttamente associati ai corrispondenti parametri del modello.⁷²

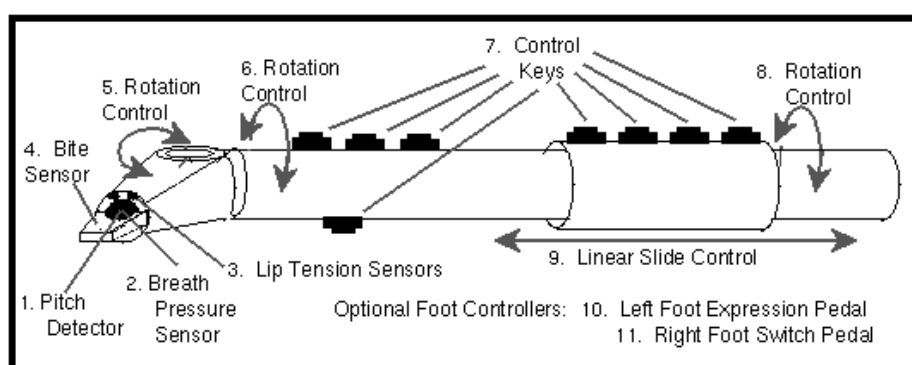


Fig. 2. 5 Meta-Wind Controller HIRN (da Cook, *Principles for Designing Computer Music controllers*, s.n.p.)

⁷¹ Il controllo di questi metodi di sintesi è condotto, infatti, per mezzo di controlli meccanici analoghi a quelli di uno strumento acustico con le medesime caratteristiche. I suoni multipli dello strumento possono essere eseguiti in tempo reale su un chip di elaborazione del segnale Motorola DSP 56001, controllato da un file di partitura NeXT; il controllo del mouse è con feedback grafico sullo schermo del computer NeXT, o tramite MIDI.

⁷² Cook, *A Meta-Wind-Instrument Physical Model* cit., p. 275.

Tale strumento permette il controllo in tempo reale di tutti i parametri interni della modellizzazione delle guida d'onda degli strumenti a fiato, grazie alle funzioni di controllo MIDI. L'HIRN sfrutta le modalità di controllo degli strumenti a fiato e aggiunge anche molte altre possibilità che prevedono anche l'aggiunta di pedali e di controlli ulteriori:

A new rotational control is mounted in the mouthpiece which varies playing position from recorder-like (end blown) to flute-like (edge blown). The controller allows a performer to effectively use much more of the real time control bandwidth available in the mouth and hands.⁷³

Chris Chafe ha esplorato le sonorità dell'*hose-player*⁷⁴ di Perry Cook, in *El Zorro* (1991),⁷⁵ una composizione basata sull'improvvisazione. A proposito di una seconda versione del brano, *El Zorro II* (1992), per trio con *Seashells* and *Buchula Lightening Controller*, Cook così si esprime:

I was wearing this velcro sensor on my hand. As I played various notes on the seashell by stuffing my hand into the bell and moving it back and forth, the sensor controlled sections of music on the computer we'd hauled along.⁷⁶

Paul Lansky ha utilizzato lo *Slide-Flute* in *Still Time* (1994).⁷⁷ Occupandosi principalmente dell'estensione dei parametri dello strumento informatico a dimensioni irrealistiche, l'autore ha prodotto paesaggi cibernetici dagli amplissimi spazi sonori, invitando

⁷³ COOK, *A Meta-Wind-Instrument Physical Model* cit., p. 273.

⁷⁴ COOK, *Principles for Designing Computer Music Controllers*, in *Proceedings of the CHI'01 Workshop on New Interfaces for Musical Expression (NIME-01)*, Seattle 2001 [4 pp.].

⁷⁵ Cfr. GLENN SPENCER, *Music Publishing and Music Representation in the Technological Age: A Symposium*, «Computer Music Journal», XVI (1992), pp. 96-98: 97.

⁷⁶ *Stanford University News Service* del 15-1-1997 cit.

⁷⁷ «Physical modeling, on the other hand, exercised my interest in the complexities of real instruments. In this instance, from *Still Time*, I luxuriated in the glories of superhuman flutes, thanks to Perry Cook's slide flute model. But once again I spent way too much time worrying about all the things that real instruments did that I couldn't manage. One of the most recent works I did is an interactive piece for five laptops, written for the Princeton Laptop Orchestra (PLOrk) called *A Guy Walks Into a Modal Bar*. The title refers to my port to SuperCollider of a number of Cook/Scavone STK physical models, the modal bar ones in particular». PAUL LANSKY, *Reflections on Spent Time. Keynote Address*, in *International Computer Music Conference*, Montreal 2009, pp. 1-13: 11-12. La prima parte di *Still Time, Panorama*, può ascoltarsi in < <https://www.youtube.com/watch?v=vQC3x6t5cE> > (accesso 21-12-2021). L'intero brano è registrato nel CD *Fantasies and Tableaux*, New World Records, 2007 (NWCR683).

l'ascoltatore ad ispezionare attivamente tale dinamico e fluente paesaggio sonoro. Così, quest'ultimo può osservare l'intrecciarsi di flussi di identità naturali e sintetiche che si presentano attraverso strutture imprevedibili che derivano da variazioni di prossimità:

I am interested in being able to emulate real instruments but mainly in the sense that I can get them to assume unreal proportions. For example, I've been using Perry Cook's flute physical model for a few years, but my favorite way of using it is to construct a model of a flute which is about 20 feet long and has a diameter of 3 feet. It produces great sounds.⁷⁸

Nel 2006, nella composizione *Concealed* di Kojs,⁷⁹ il *cyber-flute* viene implementato in Max/MSP nel quale il segnale emesso dal flautista funziona come un controller in tempo reale: ⁸⁰ il microfono traccia il segnale e lo invia a Max/MSP, dove viene contemporaneamente amplificato, elaborato e immesso nello strumento virtuale. La fusione delle sonorità degli strumenti fisici e virtuali porta alla creazione di uno strumento analogico-digitale, unico nel suo genere, che riesce a controllare rigorosamente sia le sonorità fisiche, sia quelle virtuali. Il brano esplora sonorità ai confini dell'udibilità, nelle quali il *cyber-flute* integra le componenti rumoristiche dello strumento fisico con componenti frequenziali dello strumento virtuale quasi nascoste, le quali amplificano ulteriormente i registri e la tessitura del flauto. Il *cyber-flute* è caratterizzato da una serie di parametri quali: la pressione del respiro; l'angolo di getto; il rumore; la frequenza del vibrato; il guadagno del vibrato; la frequenza del tono [fig. 2.6].

⁷⁸ Intervista a Paul Lansky del gennaio 1997

<<http://www.electronicmusic.com/features/interview/paullansky.html>> (accesso 04-01-2021).

⁷⁹ La partitura del brano è disponibile al seguente link: <http://kojs.net/Action_Music/Kojs-Concealed.pdf> (accesso 15-12-2021).

⁸⁰ Perry Cook e Gary Scavone avevano originariamente implementato il modello di flauto a guida d'onda nell'applicazione STK, che è stato, poi, portato da Dan Trueman nella libreria PeRcolate di oggetti esterni per Max/MSP (§ 1.2.5).

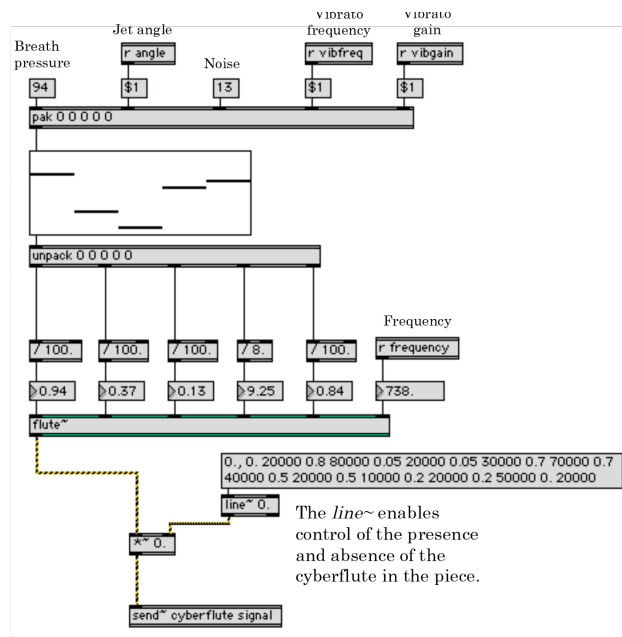


Fig. 2.6 . Interfaccia di controllo in Max/MSP utilizzata in *Concealed* (da KOJS, *Cyberactions and Cyberinstruments via Physical Modeling Synthesis: Extending Musical Realities*, p. 98)

Nell'imitare le altezze delle lettere della seconda strofa del poema *Noche oscura* di Giovanni della Croce, le frequenze del *cyber-flute* si estendono oltre i registri del flauto fisico, consentendo di produrre altezze quali, ad esempio, Sol2 (98 Hz) e Mi9 (10548 Hz). Tali sequenze di frequenze sono ulteriormente controllate dall'algoritmo per creare strutture temporali non riproducibili sullo strumento fisico, come nel caso di frequenze brevi di 50 ms per evento. Le frequenze risultanti possono essere posizionate agli estremi degli spettri ed eseguite con dinamiche fisicamente impossibili. I parametri riferibili all'angolo del getto d'aria e della frequenza del vibrato creano delle progressioni temporali controllate attraverso la forma ad arco dell'intera struttura formale.⁸¹

La partitura di *Concealed*, che unisce la notazione tradizionale con quella grafica, rappresenta i gesti del flauto e le frequenze di risonanza del modello fisico del flauto (§ 3.5.2), presenti strutturalmente sia in funzione di sottofondo, sia in funzione solistica [fig. 2.7].⁸²

⁸¹ Cfr. KOJS, *Cyberactions and Cyberinstruments via Physical Modeling Synthesis: Extending Musical Realities*, Ph. D Thesis, University of Virginia 2008, pp. 93-99.

⁸² Un video con l'esecuzione del brano si trova in <http://kojs.net/Action_Music.html> (accesso 21-12-2021).

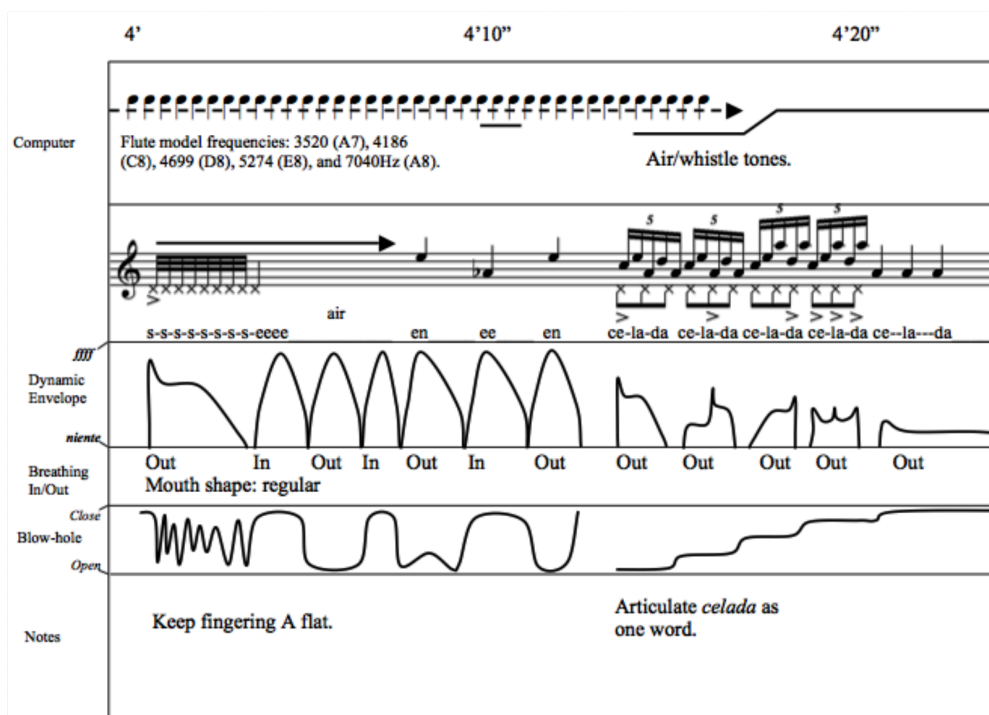


Fig. 2.7 Un estratto della partitura di Concealed, p.8.

2.2.1.5 Oxygen Flute

Nel 2001, Chris Chafe e Greg Niemeyer progettano *Oxygen Flute*,⁸³ un ambiente interattivo in tempo reale che impiega la modellizzazione a guida d'onda di quattro flauti di bambù cinesi di 9.000 anni fa, rinvenuti nei siti archeologici di Jiahu:

Archaeological finds from the Jiahu site, Henan Province, of Central China have included 25 Neolithic bone flutes similar to the present-day bamboo *xiao*. These five- to eight-hole vertical flutes were fashioned from ulnae (wing bones) of the red-crowned crane. A team at CCRMA has attempted to bring these 9.000 year-old instruments to life using physical modeling synthesis.⁸⁴

⁸³ «Artist Greg Niemeyer was commissioned in 2000 to create an interactive installation for the San Jose Museum of Art, located in the heart of Silicon Valley. Greg knew he wanted to make a tangible, sonic exhibit and enlisted me as musician. The result is a 1,500 kg sculpture exhibited from October 2001, and then from September 2002 at the Kroeber Museum of the University of California, Berkeley». CHAFE, *Oxygen Flute: A Computer Music Instrument that Grows*, «Journal of New Music Research», XXXIV (2005), pp. 219-226: 219. Tale articolo è alla base della nostra ricostruzione dell'installazione.

⁸⁴ *Ivi*, p. 222.

Il brano costituisce un esempio particolarmente interessante da analizzare, poiché rappresenta un tentativo di utilizzare il modello fisico come motore di un'installazione interattiva che costruisce uno spazio virtuale che respira, espandendosi e contraendosi nella relazione con i visitatori che quello spazio abitano. Il progetto – partendo dalla constatazione che la qualità dell'aria che si respira dipende dall'equilibrio tra la vita vegetale e quella animale – 'rende udibile' lo scambio di gas: i visitatori entrano in una camera in cui vi sono delle piante di bambù e i quattro flauti virtuali, che suonano senza soluzione di continuità. Le differenze di anidride carbonica, misurate all'interno della camera, creano il suono [fig. 2.8].⁸⁵



Fig. 2. 8 Veduta esterna ed interna dell'installazione Oxygen Flute.

Utilizzando il Synthesis ToolKit (STK), in virtù delle sue funzionalità multiplatforma e del controllo in tempo reale (§ 1.3.5), la modellizzazione della meccanica respiratoria viene ad essere modulata su diverse scale temporali mediante un sensore continuo che registra la concentrazione di anidride carbonica due volte al secondo. La scala temporale più rapida registra il respiro dei visitatori all'interno della camera, mentre la scala temporale più lenta registra accuratamente il graduale aumento di CO_2 dovuto alle emissioni di carbonio. Così, gli estremi temporali del modello sono costituiti, da un lato, dal flusso dei visitatori e, dall'altro, dal fluire molto più lento della fotosintesi delle piante, che costituisce una sorta di *continuum* al quale si sovrappone il

⁸⁵ È possibile ascoltare un estratto audio dell'installazione nel sito del compositore: <<https://chrischafe.net/oxygen-flute/>> (accesso 21-12-2021).

ciclo giornaliero delle aperture al pubblico della camera [Cfr. fig. 2.9, che visualizza tale interazione nell'arco di una settimana].

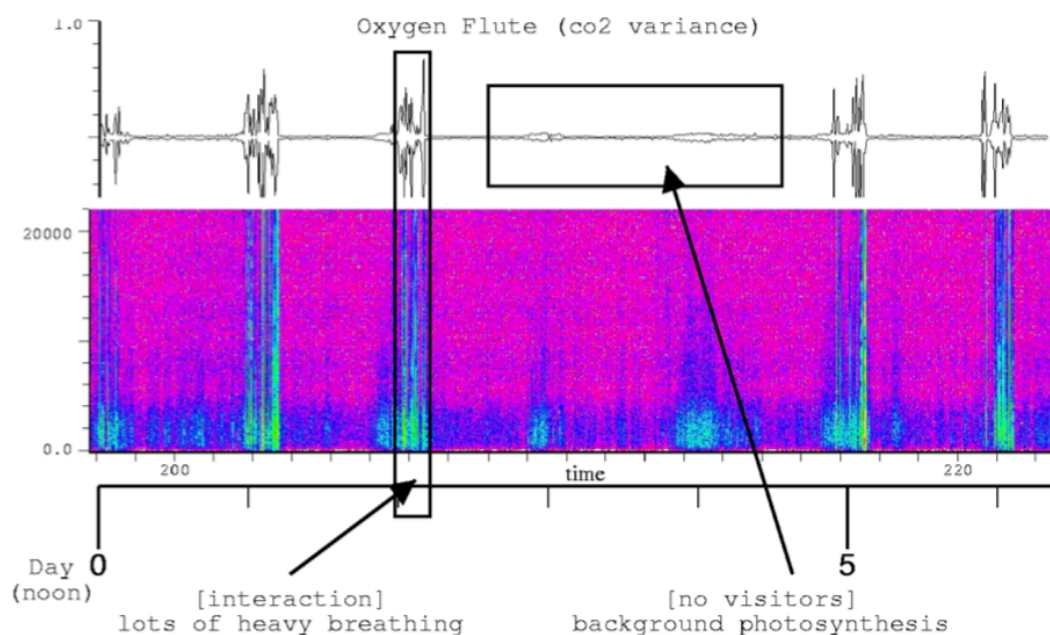


Fig. 2.9 Dati di CO₂ registrati all'interno di Oxygen Flute durante una settimana. Il grafico inferiore è un'analisi spettrale che evidenzia il contenuto ad alta frequenza dell'interazione dei visitatori (da CHAFE, *Oxygen Flute: A Computer Music Instrument that Grows*, p. 220)

Oxygen Flute impiega un algoritmo che ha due modalità esecutive: tempo reale e playback. Nello stato di riposo del sistema la musica dispiega un movimento lento che si svolge nel tempo secondo i dati precedentemente registrati. Nel momento in cui è avvertito il respiro di un visitatore, l'algoritmo muta in modalità tempo reale venendo come risvegliato ed eccitato dal respiro. Tale modalità sollecita il visitatore a respirare sempre più velocemente ed intensamente. Nel momento in cui l'algoritmo rileva la mancanza di interazione con il visitatore ritorna nuovamente nella modalità precedente.

Per articolare tale dialettica è stato creato via software uno *zoom-pendolo*: in posizione di riposo, lo *zoom-pendolo* rimane al livello ambiente, mentre, quando un visitatore vi alita sopra, il pendolo inizia ad oscillare producendo un deciso cambiamento di tempo, e innescando la modalità in tempo reale.

Analizzandolo in dettaglio, il sistema di *Oxygen Flute* comprende:

- un computer;
- un sensore di CO₂;

- quattro casse acustiche disposte in una piramide a tre lati.

I visitatori entrano sulla passerella [fig. 2.8] e vengono circondati dai bambù e dalla musica, mentre il sensore è discretamente collocato al termine della passerella medesima. Il suono dei flauti virtuali è proiettato all'interno di uno spazio artificiale che può ampliarsi o ridursi: viene così a crearsi una sorta di stanza sintetica che si sovrappone alla stanza reale.

I flauti modellizzati, che vengono eseguiti sia in tempo reale, sia mediante la storia dei livelli di fluttuazione del gas registrati nel tempo, sono stati modellizzati utilizzando i seguenti parametri [fig. 2.10]:

- lunghezza;
- posizionamento dei fori;
- diametro dei fori.

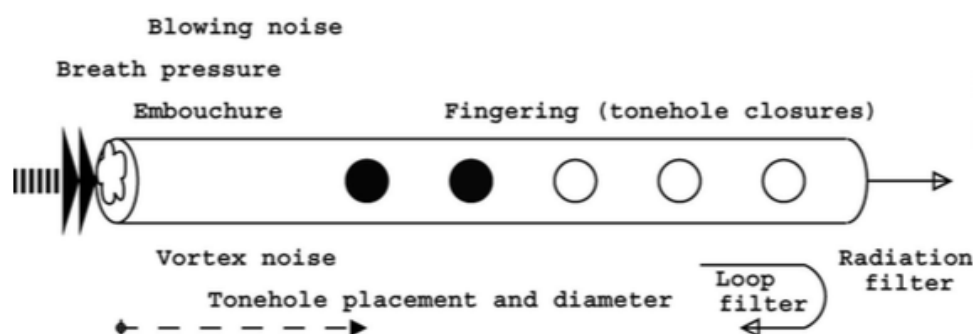


Fig. 2.10 Parametri di simulazione: Respiro, rumore di soffio e diteggiatura sono controllati in tempo reale. La geometria del tonehole, i filtri e i parametri del rumore del vortice sono impostati durante la creazione dello strumento (da CHAFE, *Oxygen Flute: A Computer Music Instrument that Grows*, p. 223)

Nel modello sono state implementate due categorie di parametri: quelli manipolabili nell'esecuzione (respiro, rumore di soffio e diteggiatura), e quelli che rappresentano le qualità peculiari dei singoli strumenti [fig. 2.10]. Il rumore del respiro è stato implementato usando la *vortex noise technique* descritta da Chafe: in ogni dato istante, i flauti ricevono una combinazione di dati CO₂ in tempo reale e di dati registrati

che si sono accumulati dall'inizio della mostra (dati storici).⁸⁶ Un mix di dati in tempo reale e di dati storici determina i valori dei parametri esecutivi di volta in volta impiegati. Questi dati monodimensionali della serie temporale arrivano all'algoritmo esecutivo e si suddividono in diversi flussi: respiro, contenuto di rumore del soffio, imboccatura (angolo di soffiaggio), diteggiatura (i fori possono essere chiusi bruscamente o delicatamente a seconda del valore del portamento), portamento, smorzamento [fig. 2.11].

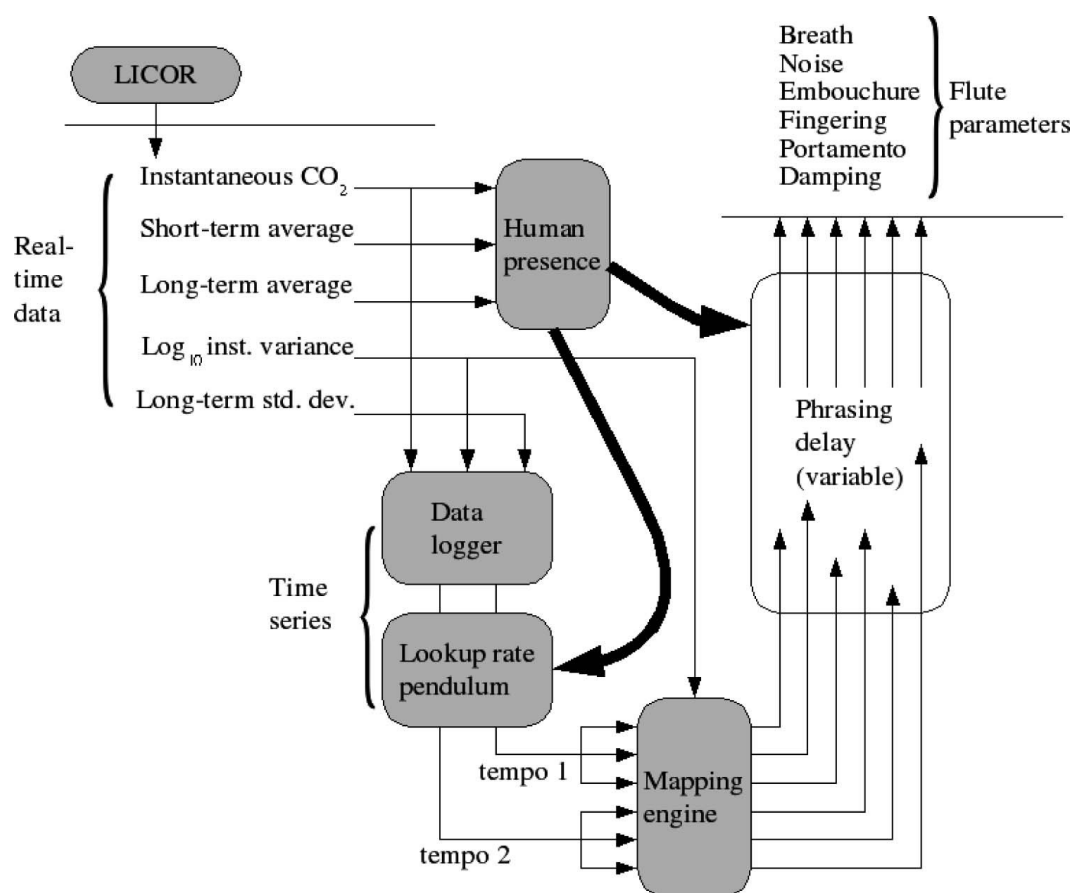


Fig. 2.11 I parametri del flauto sono controllati dalle letture di CO₂ in entrata (dal dispositivo LICOR). I moduli software analizzano le letture e traducono il comportamento dei visitatori in movimento virtuale del pendolo e in fraseggio musicale (da CHAFE, *Oxygen Flute: A Computer Music Instrument that Grows*, p. 224).

⁸⁶ CHAFE, *Adding Vortex Noise to Wind Instrument Physical Models*, in *Proceedings of the International Computer Music Conference*, Banff 1995, pp. 57-60.

2.2.1.6 SonoMorphis

SonoMorphis, the development of an audiovisual form (1998) è un'installazione 3D interattiva progettata da Bernd Lintermann (grafica) e Torsten Belschner (suono), presso il ZKM, *Center for Art and Media Technology* di Karlsruhe, nella quale un oggetto organico tridimensionale, creato utilizzando algoritmi genetici e proiettato su uno schermo davanti ai visitatori, si offre alla manipolazione audio-video dello spettatore.⁸⁷ Tra il 1995 e il 1997, l'installazione è stata sviluppata, senza parte audio, come *Morphogenesis* ed è stata poi estesa con il suono nel 1997, grazie all'uso della modellizzazione fisica per guida d'onda (Yamaha VL70-m), con l'obiettivo di creare uno strumento che permettesse, durante l'esecuzione, l'emergere di una struttura compositiva aperta non prevedibile, né ripetibile.⁸⁸

Dal punto di vista dell'utente, l'installazione è fruibile da due punti di accesso accoppiati: il primo di questi esiste nello spazio reale – i visitatori interagiscono, infatti, con un oggetto organico virtuale proiettato su uno schermo attraverso una interfaccia –, mentre il secondo punto di accesso utilizza il *world wide web* come interfaccia utente. Entrambi i sistemi consentono agli utenti di evolvere l'oggetto organico tridimensionale creato utilizzando algoritmi genetici. Tale oggetto è definito da un genoma, l'insieme di componenti che costituisce la base del mutamento. Entrambi i sistemi, reale e web, sono accoppiati e operano sullo stesso set di dati che costituiscono il genoma, cosicché le azioni nello spazio web influenzano lo spazio reale e viceversa.

Il software, per l'animazione in tempo reale dell'oggetto organico e per la creazione delle immagini necessarie per le pagine web, gira su un computer SGI. Un server web

⁸⁷ «*SonoMorphis* has been shown at the exhibition *Surrogate* Nov 1st - Dec 6th 1998 at the ZKM Institute for Visual Media. The image was projected onto the front wall of a room of 6m width and 7m depth. The projection size was 5 x 3m. The interface consists out of a mixing board plus chair which were installed 4,50m in front of the screen. The graphics ran on an SGI Onyx2 including the webserver as a graphical application. The image was projected in stereo using *Chrystal Eyes Shutter Glasses*. The moving sound sources were projected quadrophonically with two speakers in front and two in the rear. The height of the speaker mountings approached average ear level. The sound generation ran on a dedicated configuration of two Apple PPCs and Yamaha sound generators. *SonoMorphis* has also been shown during the 11th Stuttgarter Filmwinter, Jan 14th - 17th 1999, in the CAVE of the IAO, Fraunhofer Gesellschaft in Stuttgart. The user interface was located in front of the CAVE, at the Media Summer Festival, Schloss Kapfenburg, 2001, and at the "Art of Immersion" Festival, CAVE der GMD Bonn, 2002». Dal sito del compositore: < <https://www.bernd-lintermann.de/SonoMorphis/>> (accesso 21-12-2021).

⁸⁸ Un estratto video dell'installazione è visibile nel sito *The Archive of Digital Art* (ADA): <<https://www.digitalartarchive.at/database/general/work/sonomorphis.html>> (accesso 21-12-2021).

che gira sulla medesima macchina crea mutazioni sul genoma e le invia, con le relative immagini, agli utenti web. Il computer SGI comunica via TCP/IP con due Macintosh che generano i dati di controllo del suono. Un'applicazione in tempo reale si occupa dell'animazione dell'oggetto organico e reagisce alle azioni dell'utente, i quali interagiscono con un'apposita interfaccia a otto cursori, che consente di manipolare i parametri dinamici dell'oggetto e la posizione della telecamera. Tre comandi aggiuntivi sono utilizzati per innescare le mutazioni. L'applicazione e il *webserver* comunicano attraverso una connessione IPC/TCP per distribuire le mutazioni del genoma composto da dei componenti ognuno dei quali definisce una singola proprietà strutturale o formale dell'oggetto organico. Ci sono componenti che descrivono la geometria di un singolo arto e componenti che dispongono gli arti secondo algoritmi specificati. I componenti sono progettati in modo tale da incorporare i principi della forma osservati in natura, ad esempio la proporzione della sezione aurea viene utilizzata per la simulazione della spirale filotassi [fig. 2.13].



Fig. 2.12 BELSCHNER – LINTERMANN, SonoMorphis: screenshot del livello visuale dell'installazione (da <http://www.medienkunstnetz.de/themes/overview_of_media_art/immersion/28/#ref43>).

Poiché uno degli obiettivi estetici dell'installazione è quello di provocare sul fruitore una sorta di impressione corporea generata dall'oggetto, si rivelava di cruciale importanza l'implementazione di una tecnica di modellizzazione fisica che fosse in grado, sia di rendere in modo plausibile il suono di un oggetto visibile, attraverso tutte le sue alterazioni di forma e di spazio, sia di essere abbastanza astratta per non duplicare, laddove necessario, un artefatto del mondo reale.⁸⁹

Dal punto di vista dell'interazione con l'utente, l'oggetto organico tridimensionale può essere ruotato, tramite un meccanismo di controllo, in tutte le direzioni e osservato da diverse prospettive. I cursori di controllo permettono all'osservatore di variare i parametri dell'oggetto: in tal modo, lo spazio si riempie di sempre nuovi corpi audiovisivi in cui grafica e suono sono indissolubilmente interconnessi. I parametri grafici, infatti, vengono interpretati dal punto di vista acustico, al fine di far emergere una struttura musicale che dà vita a delle strutture compositive automatiche. La sovrapposizione dei livelli visivo e sonoro produce una struttura aperta, che può essere riconfigurata continuamente e all'infinito, da ogni spettatore [fig. 2.12].



Fig. 2.13 BELSCHNER – LINTERMANN, SonoMorphis: un utente durante la performance
(da <http://www.medienkunstnetz.de/themes/overview_of_media_art/immersion/28/#ref43>)

⁸⁹ Per un'accurata descrizione dell'installazione si veda il database di *Media Art Net*:
Cfr. <<http://www.medienkunstnetz.de/works/sonomorphis/>> (accesso 21-11-2020).

L'installazione vive sulla correlazione strutturale tra rappresentazione sonora e rappresentazione visiva. Ad ogni componente del patrimonio genetico viene assegnato un suono, che viene calcolato in tempo reale dal modello fisico, in base alla descrizione del comportamento vibrazionale di un corpo reale. In tal modo, il materiale, la forma e la posizione spaziale dell'oggetto organico visibile sono in relazione con le proprietà del suono, come, ad esempio, le variazioni timbriche e le alterazioni dell'intonazione, le posizioni in movimento dinamico e il tipo di suono proiettato nello spazio reale.

Nello specifico, la relazione tra la modellizzazione fisica e le trame dei genomi, si articola secondo tre direttrici: in primo luogo ad ogni rappresentazione acustica è stato assegnato un insieme di proprietà materiali, che creano il suo timbro di base dell'oggetto organico; in secondo luogo, tenendo conto della forma dei genomi, si controllano le modalità di vibrazione di base delle rappresentazioni e la loro reazione alle deformazioni indotte dai parametri; in terzo luogo, le posizioni spaziali dei singoli oggetti grafici vengono mappate allo spazio sonoro con la finalità di gestire l'installazione in modo flessibile come fosse un unico strumento musicale.

Il suono, così, rappresenta acusticamente, in modo non arbitrario, le proprietà selezionate dei genomi – cioè la loro struttura, la loro posizione e il loro comportamento – secondo modalità che si potrebbero metaforicamente associare a quelle di uno strumento musicale: un insieme di regole con variabili associate con cui generare il suono, con la possibilità di controllare tali variabili in tempo reale secondo le strutture dei genomi sottostanti. Nelle seguenti parole, Oliver Grau mette in rilievo proprio la dimensione di strumento biomorfo dell'installazione, che ne costituisce il tratto identitario più peculiare:

In the image space of «SonoMorphis,» users also «create» generations of ever-new biomorphic bodies based on genetic algorithms. Lintermann sets the artificial creatures in permanent rotation and enhances the spatial effect with stereo sound, which is also generated by random processes. Lintermann's intention is to keep the interactive structure of the installation flexible, which should be understood as an instrument, in this case an instrument consisting of visual and acoustic components. The number of possible forms is 1080; an analogy, according to Lintermann, with the total number of atoms in the universe.

Be that as it may, the number of possible variants is incredibly high and impossible to explore in full.⁹⁰

2.2.1.7 Exbow-Metasax

L'*Exbow-Metasax* è un sistema, implementato da Matthew Burtner e Stefania Serafin, costituito da un meta-sassofono,⁹¹ utilizzato come controller, e da un modello fisico di corda d'arco.⁹² La sostituzione del controller strumentale apre nuovi paradigmi nell'esplorazione timbrica a fini compositivi dei modelli fisici, rileggendo, secondo modalità completamente differenti, la relazione tra l'interfaccia di controllo e la modellizzazione fisica dello strumento, poiché, in tal modo, lo strumento virtuale viene compiutamente esplorato secondo le sue peculiari caratteristiche, indipendentemente da una loro eventuale correlazione con il mondo reale e l'acustica tradizionale [fig. 2.14].

⁹⁰ OLIVER GRAU, *Immersion and Interaction. From Circular Frescoes to Interactive Image Spaces*, in <http://www.medienkunstnetz.de/themes/overview_of_media_art/immersion/>, p. 28 (accesso 21-12-2021).

⁹¹ «The *Metasaxophone* is an acoustic tenor saxophone retrofitted with an onboard computer microprocessor, and an array of sensors that convert performance data into independent continuous control messages for a computer. The instrument has additionally been outfitted with a unique microphone system allowing for detailed control of the amplified sound. While maintaining full acoustic functionality, the metasax is also a versatile computer controller and an electric instrument». <<https://ccrma.stanford.edu/~mburtner/metasax.html>> (accesso 04-01-2021).

⁹² SERAFIN, *The Exbow MetaSax: Compositional Applications of Bowed String Physical Models Using Instrument Controller Substitution*, «Journal of New Music Research», XXXI (2002), pp. 131-140; MATTHEW BURTNER, *The Metasaxophone: Concept, Implementation, and Mapping Strategies for a New Computer Music Instrument*, «Organised Sound», VII (2002), pp. 201-213.

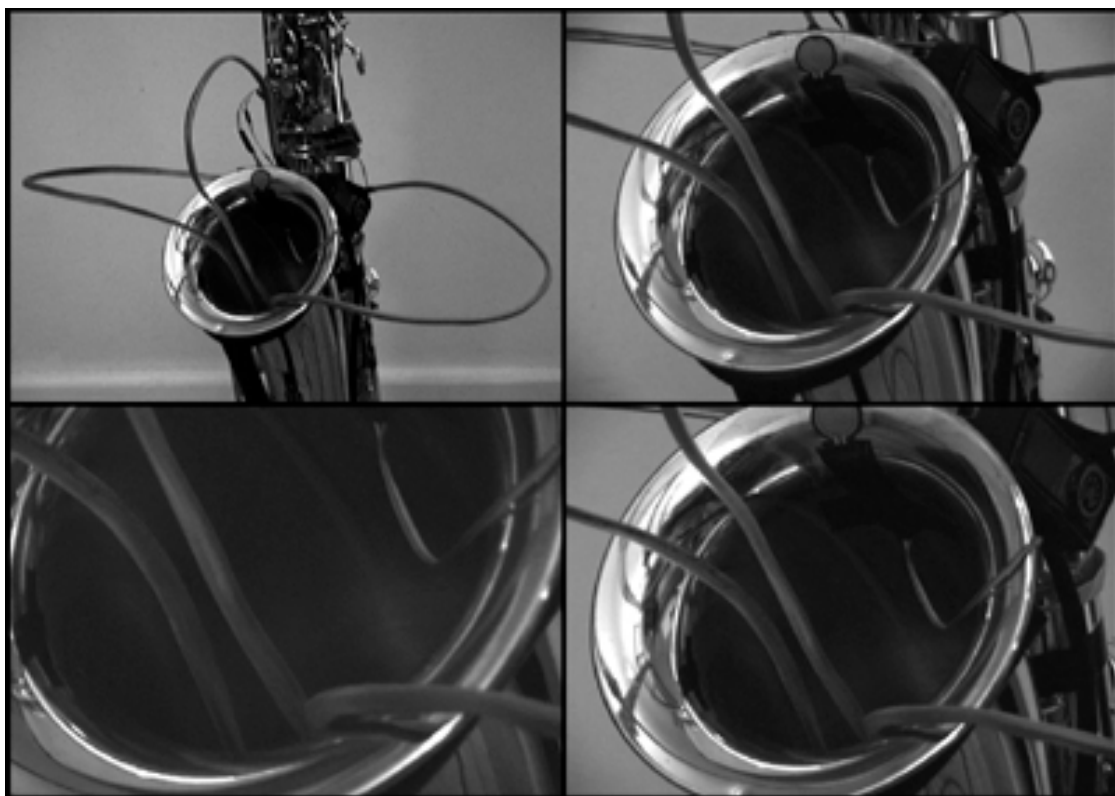


Fig. 2.14 Il sistema di microfonaggio sul meta-sax (da <<https://ccrma.stanford.edu/~mburtner/metasax.html>>).

Essendo il controller caratterizzato dalla natura dell'interfaccia meccanica del sassofono, vengono a prospettarsi nuove dimensioni espressive e nuovi spazi gestuali che ridefiniscono, secondo modalità altre, l'atto stesso di eccitare delle corde sfregate con una 'sintassi' tipica degli strumenti a fiato.

È ciò che avviene in *S-Trance-S* (2001),⁹³ in cui il meta-sassofono viene impiegato per esplorare le metamorfosi tra strumento acustico e strumento modellizzato, creando degli ensemble ibridi di sassofono e archi, in cui si stabilisce una dialettica tra i parametri di controllo e i parametri sonori.⁹⁴

⁹³ Una registrazione del brano è disponibile nel CD *Metasaxophone Colossus*, Innova Records 620 (2004), e nel canale Youtube dell'autore: <<https://www.youtube.com/watch?v=p5Xa9552qy8>> (accesso 26-12-2021).

⁹⁴ BURTNER – SERAFIN, *Real Time Extended Physical Models for the Performer and Composer*, in *Proceedings of the International Computer Music Conference (ICMC)*, Havana 2001, pp. 251-254; BURTNER – SERAFIN, *Extended Techniques for Physical Models Using Instrumental Controller Substitution*, in *Proceedings of ISMA*, Perugia, 2001 [4 pp.].

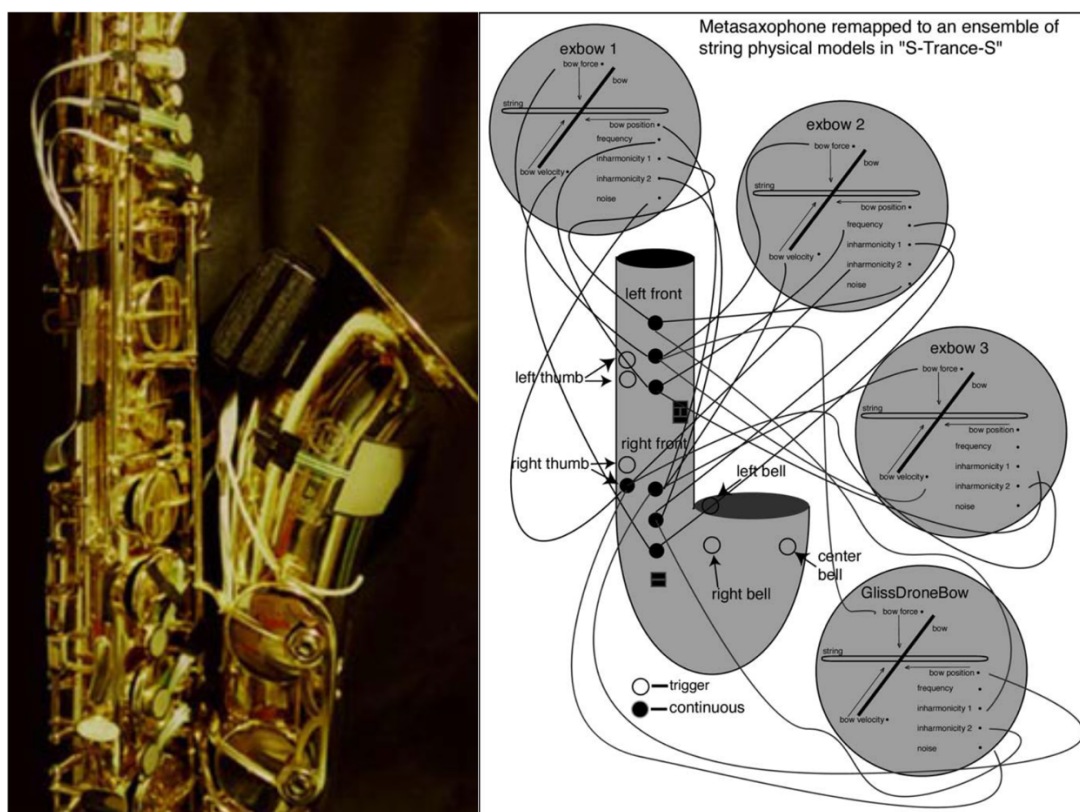


Fig. 2.15 Metasaxophone rimappato a un insieme di di corde modellizzate fisicamente in S-Trance-S (da <https://ccrma.stanford.edu/~mburtner/metasax.html>).

L'azione complessa della corda ad arco viene mappata sulla ben diversa azione complessa della diteggiatura di uno strumento a fiato, secondo due parametri di controllo che sono rilevanti da un punto di vista compositivo [fig. 2.15]: il primo è intrinsecamente legato alla produzione del suono, agendo sulla velocità e la pressione dell'arco; il secondo modifica le modalità esecutive al fine di valorizzare ed esprimere tutta la ricchezza timbrica agendo sulla posizione dell'arco, l'inarmonicità e il vibrato. Inoltre, altre diteggiature del sassofono controllano le proprietà di attrito caotico della corda e le proprietà fisiche del materiale, dando all'esecutore la possibilità di cambiare la tipologia della corda stessa dal nylon, al metallo, al vetro. Un altro processo in atto nella composizione è relativo all'ibridazione intrecciata dei suoni del sassofono con le corde d'arco. Tali timbri costituiscono una serie di sei 'schermi timbrici' derivati dalle possibili combinazioni di tre archetipi: corda ad arco, corda modellizzata, e sassofono. Un sistema ritmico controllato dal computer fornisce degli input al sassofonista, agendo come una partitura strumentale, attraverso la quale si costruisce gradualmente una melodia, che aumenta sia di intensità, sia di lirismo, sia di articolazione, man mano che

il pezzo si evolve. Mentre il sassofonista suona, premendo i tasti, che a loro volta controllano i modelli fisici delle corde, questi ultimi aumentano di complessità, passando da una singola corda a un quartetto completo con diversi tasti mappati secondo diversi parametri dell'arco [fig. 2.16]. A causa del gran numero simultaneo di strumenti e della crescente velocità esecutiva innescata dal computer, l'esecutore alla fine non è in grado di controllare il sistema e il pezzo arriva ad una evoluzione di tipo caotico in cui interagiscono in stretta interconnessione sassofono e corde.

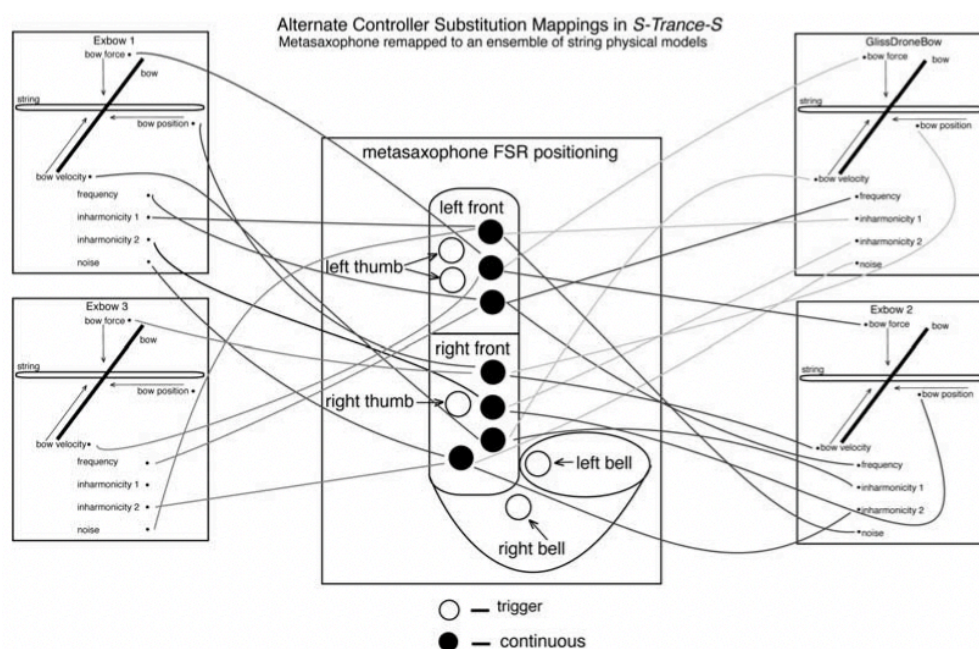


Fig. 2.16 Mappature di sostituzione dei controller degli strumenti in S-Trance-S (da <https://ccrma.stanford.edu/~mburtner/MetasaxComposition.html>)

2.2.1.8 Singing bowl

That which is bodiless is reflected in bodies (2004) di Matthew Burtner, per campana tibetana suonata dal vivo da un performer, e suono generato da computer [fig. 2.17], esplora la nozione di disincarnazione attraverso la combinazione di strumenti e ambienti fisici e virtuali. Il brano coinvolge due aree della ricerca nella sintesi del suono dell'autore: le tecniche di spazializzazione e le applicazioni della sintesi di per modelli fisici multicanale.



Fig. 2.17 Campana tibetana e pianta della Rotunda Dome-room (da <<http://matthewburtner.com/thatwhichisbodiless-album/>>).

Il brano è stato composto per la *Rotunda Dome-room* di Thomas Jefferson all'Università della Virginia, dove è stato eseguito in anteprima.⁹⁵ Il modello fisico esteso di una campana tibetana è stato implementato come strumento multicanale, reinterpretando la *Rotunda* come una gigantesca ciotola rovesciata, dotata di diffusori posizionati lungo il balcone superiore della cupola. Attraverso la modellizzazione della campana, il pubblico si trova ad essere fisicamente immerso all'interno di una gigantesca campana virtuale che corrisponde alle dimensioni dello spazio fisico reale [fig. 2.18]:

I imagined the Dome Room as a giant inverted Tibetan bowl. Speakers around the edge of the dome correspond to resonant nodes on a Tibetan bowl. A computer model of a Tibetan bowl sounds from the speakers and the audience sits in the middle, as if inside the giant bowl. The piece begins and ends with the percussionist playing the real Tibetan bowl in the room.⁹⁶

⁹⁵ Il brano è registrato nel CD *That Which is Bodiless is Reflected in Bodies*, Centaur Records (CRC 3330). La partitura è reperibile nel sito del compositore: <<http://matthewburtner.com/that-which-is-bodiless-is-reflected-in-bodies/>>.

⁹⁶ Nota dell'autore in <<http://matthewburtner.com/thatwhichisbodiless-album/>> (accesso 05/01/2021).

Il titolo del brano è desunto da un principio enunciato nell'*Oneirocritica* (*l'Interpretazione dei sogni*) di Artemidoro (ca. 200 d.C.) che allude all'inveramento dello spirito attraverso il corpo. Così, analogamente, nella composizione la campana tibetana si inverte e si reincarna mediante l'architettura della sala.

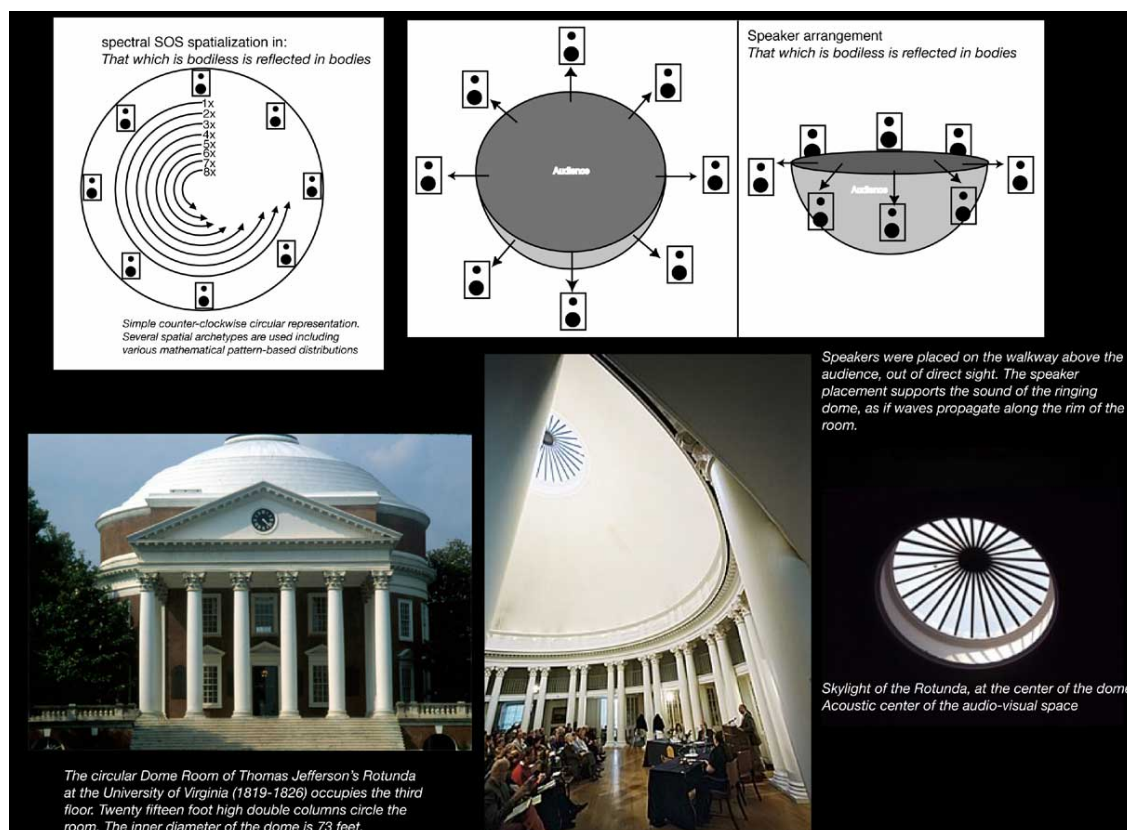


Fig. 2. 18 Mappa della spazializzazione e della disposizione degli altoparlanti (da <http://matthewburtner.com/that-which-is-bodiless-is-reflected-in-bodies/>)

Il modello fisico multimodale della campana tibetana è stato implementato in ambiente Max/MSP, grazie alle ricerche di Stefania Serafin, come uno strumento a 8 canali. Gli otto modi della campana corrispondono al posizionamento degli otto diffusori che circondano il pubblico. Le posizioni modali possono essere modulate per cambiare le proprietà della campana in tempo reale, che muta continuamente forme e dimensioni con il pulsare della musica, creando una 'reincarnazione danzante' dello spazio virtuale. Il modello fisico permette di incrementare lo spazio sonoro attraverso processi di *detuning*, *pitch bending* ed estensione dei registri al di là dei limiti fisici della campana tramite spazializzazione, e, inoltre, di esplorare una molteplicità di impulsi polimetrici e

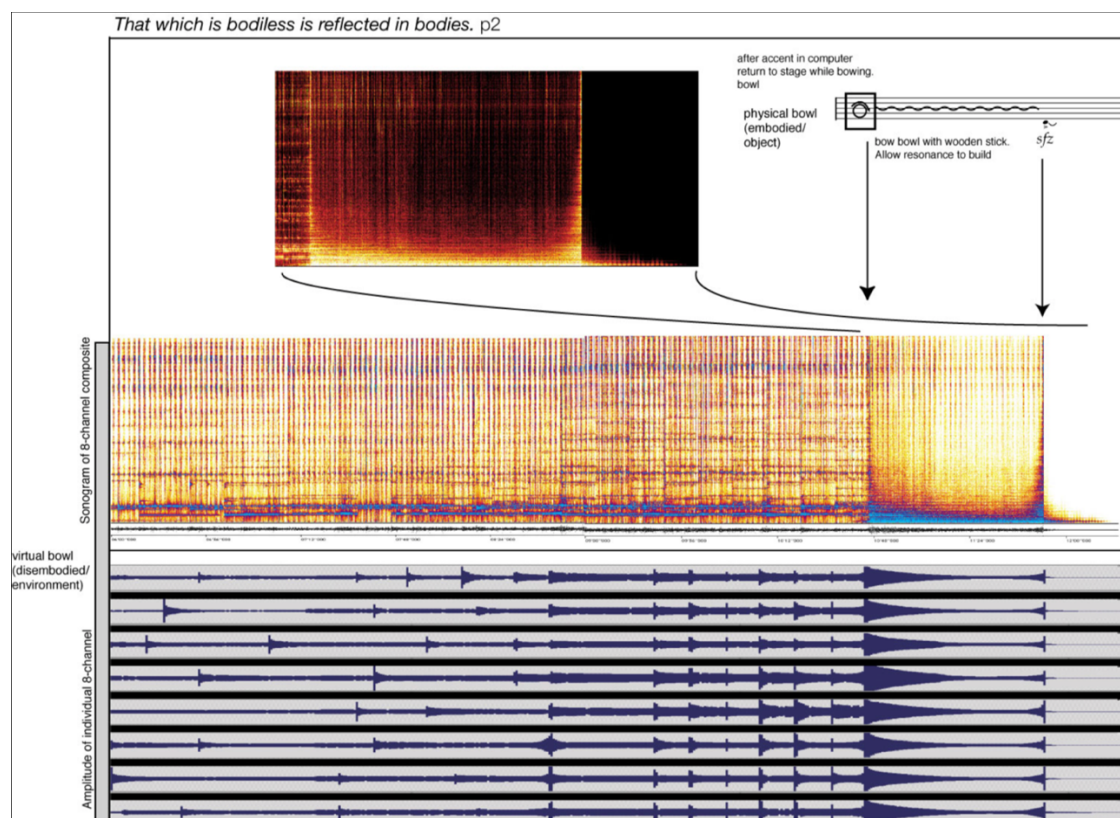


Fig. 2. 19b

Fig. 2. 19a-b Prime due pagine della partitura di *That which is bodiless is reflected in bodies* (2004).

2.2.1.9 Maraca

Il modello fisico originale della *maraca* è stato sviluppato da Perry Cook come parte del suo approccio PhISM per le simulazioni al computer di strumenti a percussione. Il modello appartiene alla sottocategoria di PhISEM, il cui suono viene generato e/o modificato da eventi discreti caratteristici, come, ad esempio, una particella che colpisce l'interno della superficie di una maraca (§ 1.3.3.2). La *maraca* è un algoritmo molto duttile in quanto può generare vari timbri che vanno dalle maracas di legno alle maracas di plastica con parti sintetiche, ai tamburelli e ai campanelli eolici. Il modello può imitare anche altri strumenti quali l'afuche, il sekere, la cabasa o altri suoni/articolazioni particolari, come lanciare una maraca da una mano all'altra. Nel modello le particelle possono essere ordinate in diversi modi e possono essere modificate agendo direttamente sugli stati del filtro, le probabilità di collisione, le dimensioni e le quantità

delle particelle. Le sonorità della cabasa, ad esempio, dispongono di risonanze meno pronunciate rispetto a quelle della maraca e sono facilmente modellizzate da una singola risonanza nell'algoritmo PhISEM di base.⁹⁹

Partendo dalle ricerche di Perry Cook, Brad Garton e Chris Chafe, Juan Reyes ha utilizzato il modello fisico della maraca implementato nel STK e trascritto nell'ambiente *Common Lisp Music* (CLM),¹⁰⁰ in *Wadi Musa (or the Monteria Hat)*¹⁰¹ del 2001, per *quenás* (flauti di pan andini), violoncello e modelli fisici di maracas e di clarinetto (su nastro). Il compositore, ispirandosi agli stili di filettatura di un cappello sudamericano (Monteria), sfrutta le potenzialità del modello fisico per creare poliritmi derivanti dalle combinazioni caotiche tra il tasso di scuotimento, la quantità di semi e la dimensione del guscio.¹⁰²

In *Wadi Musa*, la modellizzazione della performance deriva dalla capacità dell'algoritmo di simulare la meccanica della maraca, descritta mediante le leggi fisiche che governano i movimenti del corpo umano e la tensione muscolare. Tali condizioni contribuiscono ad eccitare le vibrazioni delle componenti dello strumento portando al costituirsi dei differenti timbri dello strumento, i cui spettri cambiano a seconda dell'intensità della pressione prodotta. L'autore parte, così, dalla ricognizione delle differenti modalità di produzione del suono nello strumento reale, utilizzando la variabile temporale come funzione della velocità di cambiamento della scossa delle tecniche di scuotimento [fig. 2.20]. Per eseguire un ritmo, ad esempio, è stato osservato come l'esecutore tenga ogni maraca parallela al pavimento, con i gomiti leggermente in fuori; mentre per suonare in modo morbido ed espressivo, le maracas vengono mantenute quasi nella medesima posizione per un tempo determinato, in modo da poter percuotere il corpo dello strumento con l'indice. Altri modi per cambiare il suono dello strumento sono individuati nel mutare il materiale e il numero e/o la dimensione delle

⁹⁹ Cfr. l'articolo di JUAN REYES, *Composing for the Physical Model of the Maraca*, in <https://ccrma.stanford.edu/~juanig/articles/wadi-icmc/Model_Maracas.html> (accesso 05/01/2021), utilizzato per ricostruire l'utilizzo del modello di maraca dal parte dell'autore.

¹⁰⁰ La versione CLM è una trascrizione diretta dell'algoritmo STK fatta da Bill Schottstaedt.

¹⁰¹ È possibile ascoltare il brano in <<https://ccrma.stanford.edu/~juanig/descrips/wadi.html>> (accesso 05/01/2021).

¹⁰² Cfr. la nota di sala redatta dal compositore in occasione della prima esecuzione del brano nella rassegna *Digital Music Under the Stars*, tenutasi, nel 2001, al CCRMA dell'Università di Stanford: <<https://ccrma.stanford.edu/~juanig/descrips/wadi.html>> (accesso 05/01/2021).

particelle: un suono più ‘naturale’, ad esempio, si ottiene con l’uso di particelle più piccole.

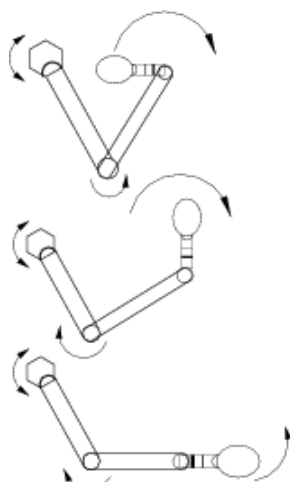


Fig. 2.20 Movimenti del braccio e della maraca (da <https://ccrma.stanford.edu/~juanig/articles/wadimc/Maracas.html>).

Per ottenere i timbri precedentemente descritti, Reyes ha concepito dei nuovi strumenti personalizzati CLM, basati sulla variazione del modello PhISEM della maraca, le cui interfacce funzionano con la manipolazione dei coefficienti dei filtri di risonanza del corpo della maraca e con la variazione dei tassi di energia della scossa e dello scuotimento: *maracon.ins* è una maraca enorme e risonante con particelle e una lista di risonanze in funzione del gesto, con o senza filtro passa-basso (il modello senza filtro passa-basso dà un suono simile a quello di una campana); *jrnoise.ins* porta i parametri del modello al bordo per ottenere un suono costante o al rallentatore della maraca o della guiro.

Dopo la costruzione di questi strumenti, l'autore ha proceduto a creare *Wadimusa.clm*, un file di partitura scritto in CLM, che permette di modificare dinamicamente i parametri di tali strumenti. La particolarità della composizione consiste, così, nell'adottare schemi ritmici riconoscibili con tempi estesi, ultra lenti o ultra veloci, poliritmi, cambiamenti nello spettro e generazione di nuovi gesti musicali, che, nella maggior parte dei casi, dipendono dalla possibilità di variare il tempo, prodotti proprio con l'intenzione di enfatizzare il contrasto con quelli tipici dello strumento (§ 3.3).¹⁰³

¹⁰³ Alcune di queste procedure sono suggerite da Garton nel suo modello di performance virtuale cfr. BRAD GARTON, *Virtual Performance Modeling*, in *Proceedings of the 1992 International Computer Music Conference*, (ICMC 1992), San Jose 1992, pp. 219-222.

L'esplorazione di Reyes nell'implementazione della maraca prosegue sviluppando l'espressività del modello, mediante un accurato settaggio dei parametri derivanti dall'attento studio delle peculiarità fisiche dello strumento reale. Se nella maraca i parametri di altezza sono assenti, la durata si rivela, invece, un aspetto strategico per la sintesi, sebbene l'autore prenda in considerazione anche fattori quali l'energia e il decadimento del sistema, il decadimento del suono, il numero delle particelle, lo smorzamento, la probabilità di collisione, la frequenza e la risonanza del corpo. La resa espressiva del modello si arricchisce delle possibilità elettroacustiche che consentono, di applicare il riverbero, gli effetti doppler e i valori di panning. Gli effetti doppler combinati con il riverbero danno l'impressione di una maraca sovradimensionata che viene lanciata nello spazio del concerto.¹⁰⁴

La messa in atto dei modelli, così, procede dall'assetto dei parametri di modellizzazione dell'espressione, che si interfaccia con l'algoritmo PhISEM per l'esecuzione dei gesti musicali, grazie alla specificazione dei tempi, delle durate e delle direzioni contenuti nel file di performance. L'autore, riguardo le modalità esecutiva del modello, fa presente che, pur essendo l'esecuzione in tempo reale più spontanea e reattiva, risulti più agevole un'implementazione in modalità off-line, poiché viene gestita in modo più efficiente la resa dei valori espressivi.¹⁰⁵

In tal senso, il modello fisico non dipende dalla modellizzazione di una tecnica esecutiva, bensì dalle caratteristiche timbriche dei suoni e dalle modalità nuove con cui questi ultimi possono essere percepiti. Così, il modello delle maracas di Reyes si è

¹⁰⁴ Poiché l'espressività negli strumenti a percussione sta nella capacità di eccitare o toccare gli oggetti (risposta tattile) con altri oggetti secondo diverse modalità, sono stati inseriti nel sistema anche i parametri energetici, quali la quantità di moto e le condizioni al contorno: la quantità di moto è descritta attraverso l'intensità, la quantità di energia, i tempi di decadimento, lo smorzamento e il riverbero; le condizioni al contorno dal numero delle particelle, la probabilità di collisione, e dalla frequenza e dalla risonanza del corpo dello strumento. Cfr. JUAN REYES, *Composing for the Physical Model of the Maraca* cit.

¹⁰⁵ Alcuni algoritmi che utilizzano queste procedure: l'algoritmo n. 1 è una chiamata con frasi di risposta della durata di un secondo, ciascuna delle quali contiene 4 scuotimenti al secondo; l'algoritmo n. 2, è costituito dalla medesima chiamata con una nuova risposta che raddoppia il tasso di scuotimento nella risposta, aggiungendo una terzina alla fine. Valori di ampiezza diversi danno valori per la direzione dello scuotimento. Manipolando i tempi di decadimento o le probabilità di collisione delle particelle, otteniamo timbri come la cabasa ma con lo shake (dinamica) della maraca; l'algoritmo n. 3, inibendo i filtri passa-basso nel modello, produce il suono delle campane a vento; l'algoritmo n.4 è un insieme completo di maraca con un ritmo sincopato di 28 misure che si muove attraverso lo spazio sonoro. Le diverse ampiezze costituiscono il battere, e gli involucri che producono il cambio di frequenza della conchiglia simulano l'effetto della muscolatura dell'esecutore e delle diverse maracas. Cfr. JUAN REYES, *Composing for the Physical Model of the Maraca*, cit.

rivelato un ottimo strumento per testimoniare le potenzialità dello strumento virtuale: dall'utilizzare tecniche esecutive impossibili nelle performance in tempo reale, alla possibilità di conseguire, nella contesto della sintesi digitale, una nuova espressività musicale fondata su una nuova estetica nella percezione.

2.2.1.10 Windchimes e Rbow

Il sistema utilizzato da Dan Trueman in *The Lobster Quadrille* e in altri brani d'improvvisazione costituisce un esempio di implementazione del modello di campane a vento di bambù, portato dal Synthesis Toolkit di Perry Cook, come sottoinsieme del suo strumento PhiSEM, all'ambiente Max/MSP.¹⁰⁶ Il modello è guidato da un nuovo sistema di controllo, il *Bowed-Sensor-Speaker-Array* (BoSSA)¹⁰⁷, costruito dall'autore stesso e collaudato in occasione della prima esecuzione del brano. Partendo dall'idea di integrare il violino con la tecnologia informatica, Trueman, in collaborazione con Cook, sviluppa una inusuale combinazione di input e output, che riorienta la relazione tra esecutore, sorgente sonora e ascoltatore:

Traditional musical instruments provide compelling metaphors for human-computer interfacing, both in terms of input (physical, gestural performance activities) and output (sound diffusion). The violin, one of the most refined and expressive of traditional instruments, combines a peculiar physical interface with a rich signal processing acoustic diffuser. We (Dan Trueman and Perry Cook) have built a new instrument that includes elements of both the violin's physical

¹⁰⁶ «The bamboo wind chimes were ported from Perry Cook's Synthesis Toolkit as a subset of his PhiSEM instrument (Physically Inspired Sonic Modeling), which includes models of a maraca, a guiro, and sleigh bells. Coded in C as a MSP external object (a precompiled executable that is inserted in the MSP signal chain), *metashake~* is computationally inexpensive, using less than about 3% of the 300MHz G3 CPU. This object, as well as an array of other models and signal processing objects that I have ported to MSP (the flute and electric guitar models, a granularizing delay line, and others) will be made freely available on the web in the near future». DAN TRUEMAN, *Bossa: Technical Details, Appendix in Reinventing the Violin*, Ph.D. Thesis, Princeton University, 1999, p. 9.

¹⁰⁷ Cfr. DAN TRUEMAN – COOK, *BoSSA: The Deconstructed Violin Reconstructed*, «Journal of New Music Research», XXIX (2012), 9 pp.

performance interface and its spatial filtering audio diffusor, yet eliminates both the resonating body and the strings.¹⁰⁸

Il sistema BoSSA [Fig. 2. 21], nel suo insieme, consiste in:

- uno speaker sferico a 12 canale (*Critter*);
- un archetto di violino con sensori che tracciano posizione, velocità e pressione dell'arco (*Rbow*);
- una tastiera di ebano dotata di sensori, che simula una singola corda, e in cui sei dimensioni di controllo sono costituite dalla misura dell'angolo e dalla pressione del dito su quattro pad montati sulla tastiera medesima (*Fangerbored*);
- un set di quattro sensori disposti come un ponticello che può essere sfregato con l'archetto (*Bonge*).

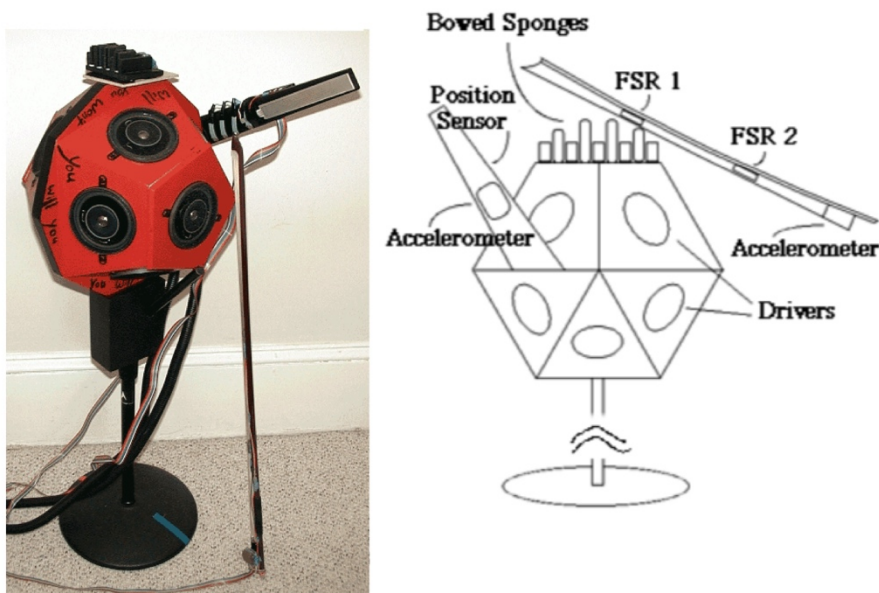


Fig. 2. 22a (BoSSA) Bowed-Sensor-Speaker- Array (da TRUEMAN - COOK, BoSSA: the deconstructed violin reconstructed, p. [5]).

L'*Rbow*, costruito da Trueman e Perry Cook, è costituito da un tradizionale archetto di violino, con due accelerometri e due sensori di pressione, che può essere suonato da solo, usando la spalla o qualsiasi altra superficie come punto di resistenza, o sul violino stesso. Trueman lo usa principalmente con un violino elettrico a sei corde, a corpo solido,

¹⁰⁸ Cfr. *ivi* cit.

in combinazione con il rilevamento dell'altezza, dell'ampiezza, e degli armonici del segnale del violino elettrico.

L'*Rbow* – che trasforma il violinista in una sorta di performer, sollecitandolo a modificare la tradizionale tecnica violinistica – offre anche una notevole flessibilità di mappatura: i dati del sensore possono essere interpretati, infatti, in molti modi che possono cambiare nel corso dell'esecuzione, anche all'interno di una singola frase e/o di un singolo gesto.

In *Lobster Quadrille* (1999),¹⁰⁹ una mappatura particolarmente efficace utilizza i dati provenienti dagli accelerometri dell'*Rbow* per guidare i modelli fisici delle campane a vento di bambù, consentendo all'esecutore di scuotere e roteare in vari modi l'arco, al fine di controllare l'energia e le risonanze dello strumento virtuale. Il brano utilizza il testo di *Alice in Wonderland* di Lewis Carroll, che viene registrato e separato per frasi, in campioni da associare alle quattro corde del *Bonge*.

I dati dei sensori vengono utilizzati per controllare gli algoritmi di sintesi e di elaborazione del segnale, a sua volta inviati ai dodici elementi che costituiscono l'altoparlante sferico, il *critter*. Nel brano vengono utilizzate alcune semplici mappature:

- la direzione dell'arco controlla la direzione di riproduzione del campione, elaborato in tempo reale;
- la posizione delle dita controlla la velocità di riproduzione;
- il movimento dell'arco eccita il modello fisico di campane a vento di bambù

Tali variabili sono indirizzate in un set di quattro filtri a pettine, le cui altezze cambiano nel corso del brano. I quattro sensori sul ponticello corrispondono alle quattro frasi campionate; la direzione dell'arco determina la direzione di riproduzione del campione e la tecnica della tastiera ne determina l'intonazione. I campioni del parlato vengono inviati ai processori di effetti: ruotando la tastiera si imposta la quantità di elaborazione, mediante la pressione dell'archetto si applica un vibrato all'elaborazione, mentre i movimenti dell'arco suonano le campane a vento [Fig. 2. 23b].

¹⁰⁹ Un'esecuzione del brano è reperibile in <<https://www.youtube.com/watch?v=rbf5nZqRjyA>> (accesso 27-12-2021).

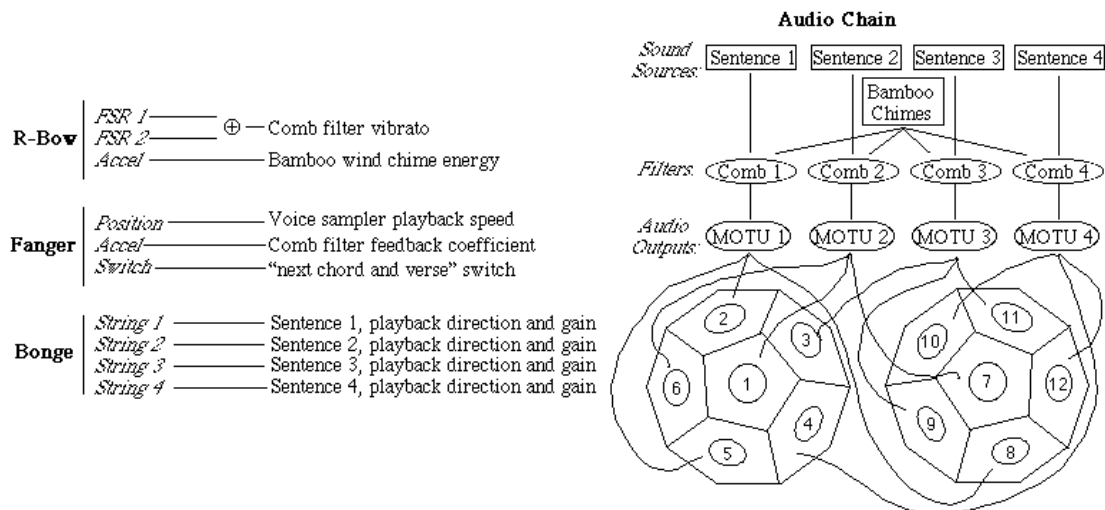


Fig. 2. 24b Illustrazione delle mappature dei sensori e del percorso del segnale audio (da TRUEMAN - COOK, BoSSA: the deconstructed violin reconstructed, p. [6]).

Dalla prospettiva del presente studio, la caratteristica più significativa del sistema usato in *Lobster Quadrille*, è rappresentato dalla possibilità di far suonare il modello fisico come se fosse uno strumento acustico, consentendo lo svilupparsi di un senso di presenza strumentale che raramente accompagna gli strumenti virtuali. Con BoSSA, infatti, si prova la sensazione che lo strumento sia nella stanza assieme all'esecutore e all'ascoltatore, secondo modalità analoghe a quelle tipiche dell'esecuzione di musica con strumenti tradizionali. Inoltre, la sorgente fisica è nelle mani dell'esecutore che può suonare sia utilizzando le tecniche violinistiche tradizionali, sia, soprattutto, reinventandole liberamente nel contesto elettroacustico.



Fig. 2.25 Esecuzione di The Lobster Quadrille con BoSSA

2.2.1.11 Cyber-Shakers

Revelations (2005) di Kojis offre l'occasione di indagare un tipo di struttura ibrida analogico-digitale, nata dall'eccitazione fisica di strumenti virtuali, scaturita da azioni del quotidiano – avulse dalla tradizione performativa degli strumenti acustici –, che si iscrive nel contesto della peculiare ricerca del compositore sulla *cyber-action composition*, oggetto di studio specifico nel terzo capitolo (§ 3.5.2).¹¹⁰ Nel brano i

¹¹⁰ È possibile ascoltare alcuni estratti audio della composizione sul sito personale del compositore: <<http://kojs.net/Revelations.html>> (accesso 27-12-2021).

modelli fisici di maraca, campane di bambù e guiro, di Cook, sono controllati da superballs di plastica, biglie di vetro e palline di metallo Bocci (*Patang*) attraverso azioni fisiche che consistono nel far rimbalzare, rotolare e raschiare i giocattoli circolari contro le piastre risonanti in plexiglas, plastica lucida e opaca, alluminio e ottone. La strumentazione si completa con una *cyber-bar* suonata con l'arco, di Essl e Cook, e con un sistema corda-arco di Serafin che integrano le azioni di raschiamento di una palla di gomma fisica contro superfici dure.¹¹¹ I modelli fisici stocastici PhiSM di Cook e il modello di percussione ad arco di Essl e Cook sono stati portati in Max/MSP come libreria PerRColate (§ 1.3.5).



Fig. 2.26 Set-up generale di Revelations (da KOJS, *Cyberactions and Cyberinstruments via Physical Modeling Synthesis: Extending Musical Realities*, p. 85).

Le azioni dei giocattoli fisici circolari vengono amplificate e le sonorità di questi ultimi sono combinate con le loro controparti fisiche o gestuali nell'ambiente Max/MSP. L'ampiezza del segnale audio della performance viene tracciato e analizzato dall'oggetto

¹¹¹ KOJS – SERAFIN, *Everyday Objects in Interactive Electroacoustic Compositions*, in *Proceedings of the 4th Sound and Music Computing Conference*, Lefkada 2007, pp. 338-344.

esterno Max/MSP *bonk~* e *fiddle~*. Un microfono è posizionato sotto ogni piastra per aiutare a trasferire il segnale audio in Max/MSP [fig. 2.24].¹¹²



Fig. 2.27 Giocattoli circolari e piatto risonante di metallo in *Revelations* (da KOJS, *Cyberactions and Cyberinstruments via Physical Modeling Synthesis: Extending Musical Realities*, p. 85).

La relazione tra gli strumenti fisici e quelli virtuali è il risultato di una mappatura parametrica dei contorni di ampiezza forniti dai gesti degli strumenti fisici ai vari parametri degli strumenti virtuali. Le forme di ampiezza riflettono le attività fisiche di:

- rimbalzo (brevi raffiche discontinue di energia nello spettro di ampiezza);
- *scrapping* (gesti di ampiezza decadenti di durata non superiore a 2 secondi con un forte attacco iniziale);
- *rolling* (ampiezza continua sostenuta con leggere fluttuazioni dello spettro di energia);
- *shaking* (ampiezza continua sostenuta nella gamma superiore con picchi più grandi che sono principalmente il risultato di gesti musicali assegnati).

La relazione tra le azioni generate dal computer e le azioni degli esecutori è specificata nella partitura, come è mostrato nell'esempio seguente [fig. 2.25].

¹¹² KOJS, *Cyberactions and Cyberinstruments via Physical Modeling Synthesis: Extending Musical Realities* cit., p. 84.

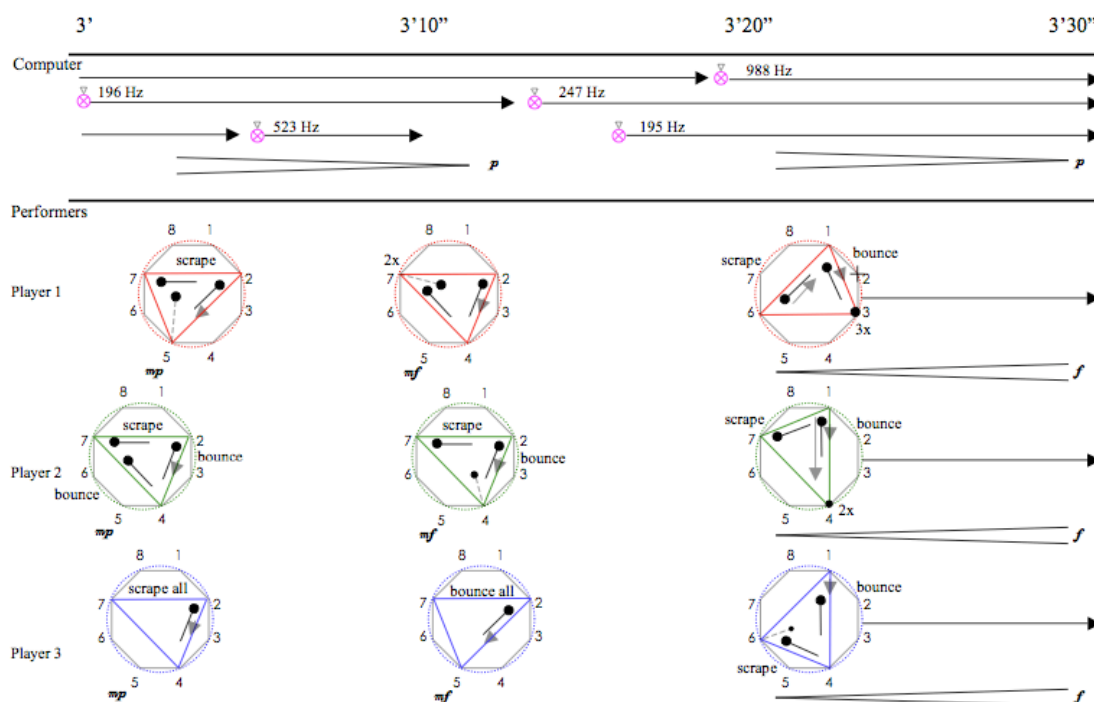


Fig. 2.28 Un estratto dalla partitura di *Revelations*. Il sistema superiore indica la performance del computer, mentre i tre sistemi inferiori mostrano le istruzioni per i tre esecutori.

In generale, gli strumenti virtuali contribuiscono all'estensione timbrica e temporale dei gesti di raschiatura a rapido decadimento delle piastre fisiche, in particolare quelle di plastica. Le strutture ibride analogico-digitali di risonanza sono il risultato della combinazione dell'eccitazione fisica di raschiamento e del riverbero degli strumenti virtuali.

Il brano è suddiviso in quattro parti secondo la prevalenza delle seguenti tipologie di azione –scuotimento, raschiamento, rotolamento e rimbalzo–, anche se le modalità di esecuzione fisica non si allineano necessariamente alle azioni simulate al computer. Nella sezione di apertura, ad esempio, l'azione del rimbalzo attivata dagli esecutori è completata dagli strumenti agitatori modellati fisicamente. I modelli fisici di cabasa, guiro e maraca sono impiegati per estendere la sonorità dei giocattoli circolari agitati in un contenitore chiuso, assimilati a strumenti agitatori a percussione. Tali strumenti virtuali implicano eccitatori circolari (perline) e risonatori chiusi nella produzione del suono.

Nella parte iniziale del brano, i tre esecutori utilizzano palline di gomma rimbalzanti per controllare i *cyber-shaker* secondo i seguenti parametri:

- ampiezze di picco dei rimbalzi individuali;

- numero di rimbalzi smorzati in un gesto;
- velocità di rimbalzo (derivata dal tempo che intercorre tra i singoli rimbalzi);
- guadagno complessivo (basato sulla differenza tra l'ampiezza del rimbalzo iniziale e quello finale);
- frequenze di risonanza dei piatti.

Questi parametri sono mappati alternativamente ai parametri di controllo dei *cyber-shaker*, a differenza dei modelli fisici della barra di percussione ad arco e delle corde – utilizzati per integrare l'attività di attrito e i suoni della palla di gomma fisica che si sfrega contro le superfici dure – che, nel corso del brano, seguono una mappatura allineata con i modelli acustici, ma aumentata: le frequenze del modello, ad esempio, corrispondono a trasposizioni estreme delle frequenze identificate con i piatti.

In generale, alcuni parametri dei modelli fisici e gestuali rimangono fissi o controllati da meccanismi interni Max/MSP, al fine di assicurare la connessione tra il disegno compositivo del pezzo e le sue componenti in tempo reale. Ad esempio, l'aumento del numero dei rimbalzi e del numero delle perline corrisponde continuamente all'incremento delle pulsazioni all'interno dei modelli ritmici eseguiti dagli esecutori dal vivo.

Il modello gestuale del rotolamento si basa su un'osservazione empirica del suo comportamento da un punto di vista sonoro e fisico. Pur non prescindendo dai complessi risultati spettrali dell'interazione tra l'eccitatore (sfera) e il risonatore (superficie), tale approccio enfatizza l'evoluzione complessiva del gesto nel tempo. Così, le componenti di frequenza vengono aggiunte dopo aver modellizzato le corrette forme di gestualità.

I parametri del modello del gesto di rotolamento, che possono essere controllati in tempo reale in Max/MSP, sono:

- la velocità di rotolamento;
- il numero delle rotazioni;
- il tempo di decelerazione (simulazione dello smorzamento);
- il guadagno complessivo;
- l'ampiezza dell'involuppo delle singole rotazioni;
- gli spettri di frequenza (come risultato del prendere in considerazione l'interazione sfera/superficie).

I fenomeni di rimbalzo e di rotolamento condividono proprietà simili, come il numero conteggiabile di eventi (rotolamenti o rimbalzi) e la forma del guadagno complessivo di decadimento. Tuttavia, mentre il rotolamento decelera, il rimbalzo accelera nel tempo.

L'approccio alla modellizzazione gestuale è particolarmente efficace (e poco costoso da un punto di vista computazionale) nella simulazione di suoni in cui il parametro temporale è essenziale per l'esistenza del suono medesimo. Per esempio, il rotolamento e il rimbalzo saranno identificati solo quando un certo numero di eventi si dispiegano nel tempo: a meno che non sia inserito in una sequenza temporale, un singolo rimbalzo o rotolamento, infatti, risulta difficile da caratterizzare in quanto tale.

Poiché il brano è stato composto con l'intenzione di controllare completamente il materiale musicale e l'interazione uomo-macchina, le azioni fisiche degli esecutori controllano in modo unidirezionale gli strumenti virtuali, secondo la relazione tipica degli strumenti estesi. La complessità delle relazioni, che derivano dal numero di strumenti coinvolti, è, così, bilanciata da un livello di mappatura trasparente, in virtù della quale gli esecutori sono in grado di sentire chiaramente, e senza ritardi, quanto le loro azioni influenzino il comportamento degli strumenti virtuali. I giocattoli circolari più sofisticati permettono un maggior numero di possibilità timbriche, un controllo più efficace e un contatto più stretto tra l'esecutore, l'azione fisica e i meccanismi di produzione del suono: un migliore controllo e un migliore contatto tattile, tra i giocattoli e le superfici, si traduce, infatti, nella creazione di sonorità fisiche più focalizzate e di sonorità virtuali più raffinate.

2.2.1.12 Orchid's Hybrid Cyberinstruments

Tra i pochi esempi di strumenti virtuali ibridi documentati nella letteratura specialistica, emerge *E-clip-sing* (2008), di Kojs, per clarinetto amplificato, chitarra, violoncello, contrabbasso ed elettronica, la cui specificità consiste nel trattamento dell'ibridazione ispirato al processo biologico della combinazione di elementi correlati in nuove forme.¹¹³ Il brano è emblematico in quanto fonde elementi musicali, strumenti e azioni

¹¹³ Cfr. KOJS, *Virtual Reality and Sonic Cyberspaces: Augmentation, Hybridization and Abstraction*, in «International Journal of Arts and Technology», VI (2013), pp. 167-180.

performative, riferendosi metaforicamente all'incrocio biologico del genere orchidea, un incrocio naturale, che testimonia quanto le barriere genetiche tra le specie possano essere molto più fluide di quanto si potrebbe pensare: l'incrocio di orchidee, infatti, quando coinvolge classi strettamente imparentate, porta spesso a un vigore ibrido che produce una crescita più rapida, una fioritura più lunga, e altri miglioramenti della specie. Gli strumenti virtuali ibridi, qui progettati in Tassman, combinano parti di più strumenti generatori in un'unica struttura vibrante tramite connessioni parallele, seriali e di rete.¹¹⁴

La composizione, della durata di 11 minuti, è organizzata in tre movimenti: *Buiara*, *Psychopsis* e *Odontocidium*, dal nome di tre ibridi contrastanti di orchidee.¹¹⁵ Nel primo movimento, l'elettronica adotta plettri virtuali ordinati in serie, che eccitano altri plettri e mazzuole che colpiscono altre mazzuole, costruendo, così, strumenti virtuali ibridi. Altri gesti performativi, come pizzicare un piatto con il plettro, enfatizzano ulteriormente la natura ibrida degli strumenti virtuali. Implementati in vari cicli di feedback, tali meccanismi evidenziano la parte percussiva dell'azione della performance, integrando efficacemente i timbri strumentali [fig. 2.26].

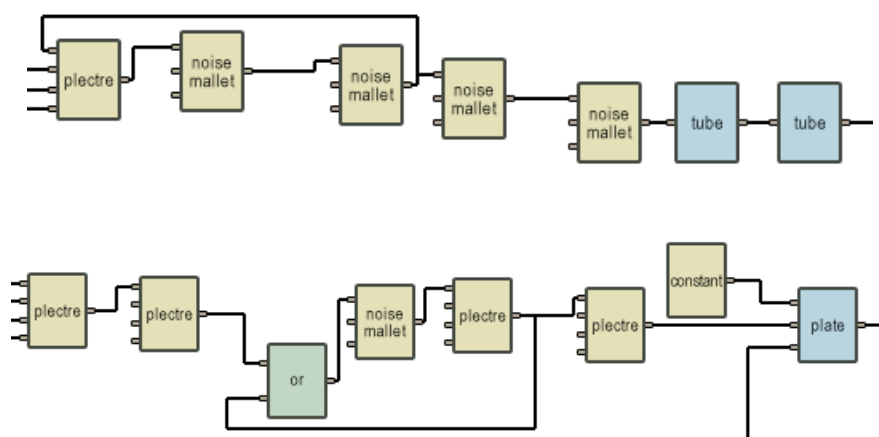


Fig. 2. 29 Due strumenti ibridi che enfatizzano i meccanismi di eccitazione del pizzicare e del colpire (da Kois, *Cyberactions and Cyberinstruments via Physical Modeling Synthesis: Extending Musical Realities*, p. 135)

Nel secondo movimento del brano, *Psychopsis*, l'elettronica è costituita da strumenti ibridi con un singolo eccitatore (un plettro) collegato a diverse strutture

¹¹⁴ Cfr. KOIS, *Cyberactions and Cyberinstruments via Physical Modeling Synthesis: Extending Musical Realities* cit., pp. 132-139.

¹¹⁵ La partitura della composizione non è stata pubblicata. Un video è disponibile nel sito del compositore al seguente link: < <http://www.kois.net/E-clip-singNTSC.mp4> > (accesso 12-12-2021).

risonanti in parallelo quali travi, membrane e piastre. La complessità aumenta ulteriormente perché i risultati di tali risonatori si incrociano con altre parti aggiuntive [fig. 2.27].

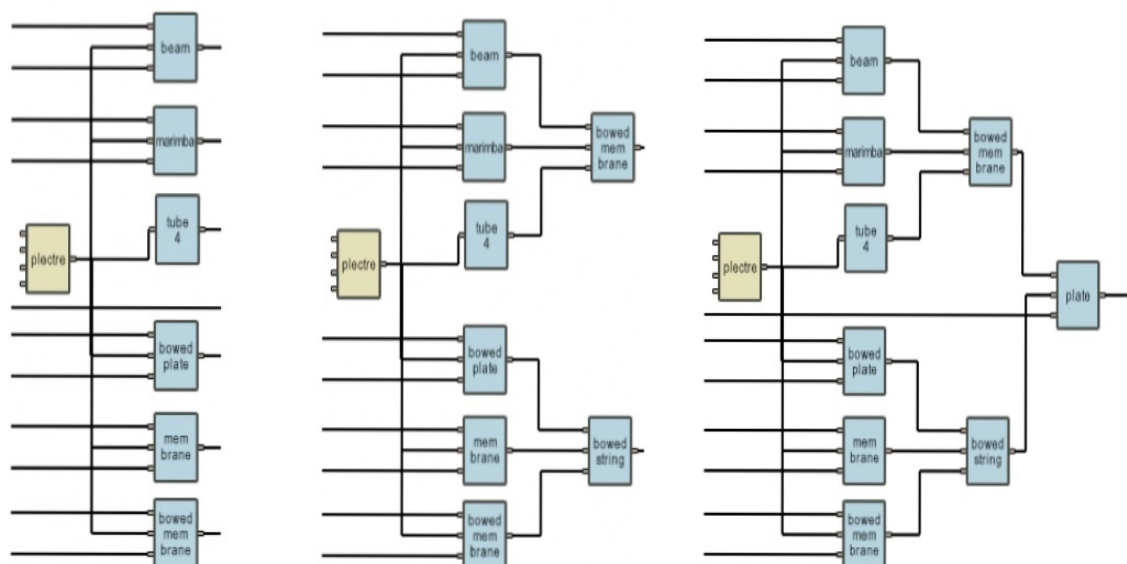


Fig. 2.30 Tre strumenti ibridi collegati in parallelo. Si noti che il plettro virtuale pizzica elementi fisicamente non pizzicabili (da Koss, Cyberactions and Cyberinstruments via Physical Modeling Synthesis: Extending Musical Realities, p. 136)

Il movimento finale, *Odontocidium*, propone azioni esecutive ibride, quali sfregare l'arco e strappare i crini con le dita, e pizzicare i plettri. Per completare tali gesti esecutivi ibridi, l'elettronica presenta reti ibride chiuse, in cui ogni singolo cambiamento del parametro di controllo, all'interno di qualsiasi parte costituente, comporterà una conseguente alterazione del comportamento dell'intera rete. L'altoparlante virtuale può essere collegato a qualsiasi luogo all'interno della rete per ascoltare il segnale audio [fig. 2.28]:

To complement the various physical hybrid actions, the electronics in this last part of the composition present networks of exciters and resonators. Creating a metronomic pulse, they serve as a conducting force which leads the ensemble through this movement. Figure [2.28] exemplifies such a hybrid network. In it, a single mallet excites a cyberbeam, which then excites the cybermarimba and bowed cybermarimba and in turn controls the bow velocity of the bowed cyberstring. The cybermarimba also excites the mallet in a loop and controls the bow force of the cyberstring, while the bowed cybermarimba controls the

damper signal of the beam. Once excited, this network continues resonating according to the alignment of its constituent parameters.¹¹⁶

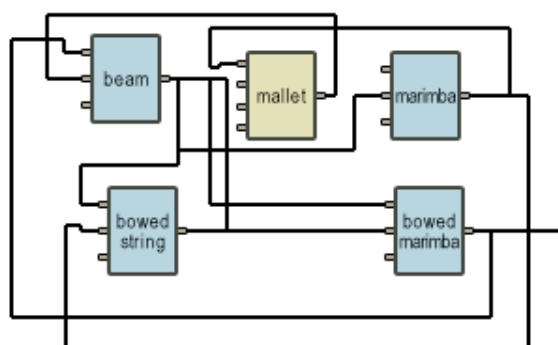


Fig. 2.31 Uno strumento ibrido in azione. Le varie parti sono collegate in una rete chiusa che si può ascoltare in qualsiasi punto (da Koss, *Cyberactions and Cyberinstruments via Physical Modeling Synthesis: Extending Musical Realities*, p. 138)

2.2.2. Gli strumenti virtuali nel dominio dell'astratto

Gli strumenti astratti, pur essendo radicati nella meccanica, non hanno equivalenti nella realtà fisica: se la realtà ibrida consente la riconfigurazione formale di strumenti del mondo reale, la realtà astratta implica, invece, il trascendere, attraverso la modificazione delle strutture e delle funzioni degli oggetti e degli strumenti, i principi della realtà fisica stessa all'interno di una dimensione del tutto fluida in termini di fisica interna e di identità sonore.¹¹⁷ In particolare, come si è visto nel capitolo I, uno dei primi ambienti compositivi che ha permesso la creazione di strumenti astratti è stato Genesis, il quale, attraverso l'uso del formalismo Cordis-Anima, fondato sul paradigma di reti massa molla – che consente, per sua natura, illimitate possibilità di combinare le componenti elementari della produzione del suono quali masse, molle e smorzatori –, ha consentito di creare strutture sonore con topologie virtuali del tutto trascendenti.¹¹⁸

¹¹⁶ *Ivi*, p. 137.

¹¹⁷ Cfr. CADOZ – LUCIANI – JEAN-LOUP FLORENS – CASTAGNÉ, *Artistic Creation and Computer Interactive Multisensory Simulation Force Feedback Gesture Transducers*, in *Proceedings of the 2003 Conference on New Interfaces for Musical Expression* (NIME-03), Montreal 2003, pp. 235-246.

¹¹⁸ Tra le altre applicazioni che permettono la costruzione di strutture sonore astratte, sviluppate successivamente, si ricordano PMPD, TAO e tutte le implementazioni posteriori fino al più recente Synth-A-Modeler (§ 1.2.6).

Un modello elaborato con Cordis-Anima non ha la forma di un diagramma orientato, ma di una rete i cui nodi e collegamenti, per principio doppi, creano interazioni bidirezionali, caratteristica, questa, che interessa tutte le componenti del sistema, qualunque sia la scala: dalla scala temporale del gesto alla macrostruttura musicale.¹¹⁹ Ciò annulla una qualsiasi gerarchia predeterminata, poiché qualsiasi gerarchia può essere decisa dall’approccio di modellazione. Di conseguenza, le proprietà dei modelli derivano, per ‘emergenza’, esclusivamente dalle proprietà locali delle loro componenti e dal modo in cui sono combinate nella rete: sia gli oggetti a bassa frequenza (generatori di movimento), sia quelli ad alta frequenza (generatori audio), infatti, possono essere combinati e fatti interagire secondo diverse scale temporali e spaziali, consentendo ai diversi elementi di trasformarsi l’uno nell’altro, e commutando e/o sovrapponendo le loro funzioni, di costruire una realtà sovra-congruente con il mondo fisico, una realtà i cui i principi di creazione si estendono ai domini della composizione e della performance. Ad esempio,

in order to observe the movement of these parts in the same simulation space, one will be able to play the model animation independently from the sound and to slow it from 44100 frame/sec down to 1 frame/sec. Likewise, the movement of instrumentist and instrument models can occur at various spatial scales. One could easily observe movements, in the same space of simulation and with a continuous zoom, from the scale of quarks to the scale of the distance between our galaxy and the one of Andromeda. This consideration was the very purpose of Claude Cadoz’s piece “*pico..TERA*”.¹²⁰

Ne consegue, che i modelli tendono ad essere percepiti, non tanto come costruzioni matematiche o algoritmiche, ma come oggetti che si definiscono mediante processi di interazione, all’interno di una simulazione in cui la sintesi del suono è, però, soltanto una delle sfaccettature di un approccio che permette di produrre anche i movimenti per le immagini animate, così come i sistemi utilizzati con interfacce gestuali, dai dispositivi force-feedback ai dispositivi aptici (§ 1.3.2.). In tal senso, il cuore di tale approccio si costituisce, non solo nella dimensione sonora, ma, più in generale, nella modellizzazione

¹¹⁹ Cfr. CASTAGNÉ – CADOZ, *Creating Music by Means of ‘Physical Thinking’* cit.

¹²⁰ JÉRÔME VILLENEUVE – CADOZ – CASTAGNÉ, *Visual Representation in GENESIS as a Tool for Physical Modeling, Sound Synthesis and Musical Composition*, in *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression*, Baton Rouge, LA, 2015 pp. 195-200: 197.

della materia, una manipolazione diretta incentrata sull'interazione tra *gesto* e *oggetto*, all'interno di un ambiente multisensoriale in cui interagiscono l'udito, vista e senso aptico (§ 3.2).

Pensando il tutto attraverso la dialettica gesto-oggetto, all'interno del quale tutto è possibile, gli strumenti musicali, in quanto oggetti definiti nelle proprie specifiche e imprescindibili funzioni vengono a cadere, aprendo ad una concettualizzazione della realtà musicale che si costituisce nell'incrocio e nella fusione di strumento, performance e composizione, facilitando l'emergere di una miriade di identità sonore astratte, in cui, se, da un lato, qualsiasi struttura o fenomeno potenzialmente vibrante può risultare significativo dal punto di vista sonoro, dall'altro la stessa organizzazione compositiva può essere concepita in funzione della simulazione del comportamento fisico, come frutto di una inedita formalizzazione di principi altri, in cui le azioni possono diventare strumenti, mentre, a sua volta, lo strumento può diventare forma.

Fin dall'inizio, Genesis ha testimoniato le possibilità di interattività e di multisensorialità di Cordis-Anima, costituendosi come ambiente di sintesi audiovisiva completo, forse il primo del suo genere, che permette agli artisti – attraverso l'uso di un unico modello fisico, responsabile della produzione audio e visivo-motoria intrinsecamente correlata – di concentrarsi direttamente sul suono, percependo il lavoro di simulazione come la creazione di un oggetto su cui agire fisicamente in modo da poterne sentire, vedere e percepire al tatto reazioni e comportamenti.

L'uso di modelli astratti in *Esquisses* (1993), prima importante opera artistica con il linguaggio Cordis-Anima, pone in rilievo, fin da subito, la questione centrale di tale paradigma, quella della rappresentazione di un oggetto multisensoriale, costruito non tanto nel segno di una ricostruzione fisicamente accurata dell'oggetto simulato, quanto dalla complessa interrelazione degli elementi che si incrociano all'interno del modello.

Le seguenti parole di Cadoz ben testimoniano, infatti, quanto la manipolazione del suono si iscriva in un *modus operandi* del tutto nuovo, in cui la multimodalità assume una funzione centrale nella creazione:

The materials given to creators with this tool, which reconstructs the universe in its own way beginning with very small elements, cannot be of a great complexity and also, can only be understood and mastered after a fully elaborated confrontation, cohabitation and

experimentation. Thus, the first purpose of the work was to get accustomed to archetypal and elementary objects and energies, but also to try to understand their secrets through their representation.¹²¹

Gli *Esquisses*, nel complesso della forma generale organizzata in tre atti [fig. 2.29], presentano una grande varietà di simulazioni, che costituiscono una sorta di progressione, per oggetti ed energia, dal più elementare al più elaborato. Nella prima parte, il brano articola metaforicamente la distinzione tra oggetti fisici, sui quali le forze naturali o umane vengono a inscrivere un movimento, e queste stesse forze generatrici di movimenti, per proseguire ad instaurare la distinzione, da un lato, tra gli oggetti fisici e l'uomo, irregolari per essenza, e, dall'altro, il processo di pensiero – ben rappresentato dal numero che si esprime attraverso la metrica e le scale di tempo e spazio – e ciò che l'uomo inventa con l'aiuto degli strumenti da egli stesso costruiti. Così, per quanto riguarda gli oggetti simulati, ne emergono alcuni di poco strutturati – quali la sabbia o i gruppi di particelle che hanno la capacità di creare ordine – che si costituiscono in forme, da una moltitudine disorganizzata; oppure, alcuni altri molto strutturati costruiti dall'uomo, quali meccanismi, oggetti articolati e strumenti: un orologio simboleggia, ad esempio, l'elaborazione dell'ordine temporale a partire dalla gravità. Per quanto riguarda gli elementi che generano i movimenti, invece, vengono rappresentate le forze energetiche naturali, come la gravità o i venti, e l'energia umana trasmessa dal gesto.

A questo primo argomento metaforico, si aggiunge l'opposizione stabilita, da un lato, tra gli oggetti fisici o l'uomo, che sono naturalmente irregolari, e, dall'altro, il numero. In questo caso, la simulazione di oggetti fisici avverrà attraverso la rappresentazione della loro irregolarità essenziale e ontologica, mentre il puro e semplice uso del computer per la composizione di impulsi acustici avverrà insieme alla rappresentazione del rigore numerico e metrico, astratto da ogni contingenza materiale.

Il modello fisico multisensoriale, utilizzato come materiale creativo, pone una interessante problematica riguardo la dualità referenzialità/artificio.¹²² Per esempio, l'idea di pioggia può essere realizzata tramite la simulazione fisicamente accurata

¹²¹ CADOZ – LUCIANI – FLORENS, *Physical Models for Music and Animated Image: The use of CORDIS-ANIMA in Esquisses a Music Film by ACROE*, in *International Computer Music Conference 1994*, Aarhus 1994. pp. 11-18: 12.

¹²² Cfr. HUGUES DUFOURT, *L'artifice d'écriture dans la musique occidentale*, «Critique » CCCCVIII (1981), p. 465-77.

(multisensoriale) delle gocce che cadono su una superficie d'acqua, ma può anche essere ottenuta dalla combinazione di modelli fisici trattati separatamente con finalità non meramente riproduttive del fenomeno, bensì aperte e mirate all'ottenimento della trasfigurazione artificiosa del fenomeno naturale che ne amplifichi le dimensioni ritmica, visiva ed acustica, enfatizzandone la poesia soggiacente ed, infine, amplificandone il complesso delle potenzialità musicali, in un processo combinatorio in cui ognuno dei modelli non solo si giustappone, ma si organizza in una profonda simbiosi interattiva.

Act I - Out of natural forces

In this act, the objects which produce sounds and images have been set in motion by natural forces such as gravity or wind.

Scene 1 - Dunes

(Without sound)

Sand in an hour glass, dunes in the desert.. The transition from a chaotic wind of particles towards a form misleadingly solid is probably one of the most beautiful and the most worrying which exist; with its slow evolutions, its immobility, its fluidity; with furthermore, the hardness of grains of flint and the softness of dunes which they generate.

Scene 2 - Winds

(Image and sound)

Out of the primary hostile, dry and granular universe, the wind drives towards continuity in all its states; flurries, breezes, uprisings and calm. The chants of Aeolian harp, the whistling of "la tuile aux loups", indicates a before and an after in time, indicates that something is happening, that a transition is tightening.

Scene 3 - Rains

(Image and sound)

Rain sings. Rains chatters: "On the outskirts of the copses, I no longer listen to those words which speak with human voice yet speak droplets and far away leaves. Can you hear? Rain falls on the solitary greenery with tapping so persistent and so differing, depending on the thickness or the sparsity of the leaves Listen.... as an infinite collection of instruments under numerous fingers." - (G. D'Annunzio)

Act II - Clocks

(Image and sound)

Time is only sized by man through machines which he makes, so desperately, to stop it or count it. As for Robinson, life mastered begins by the marking of time. This is the start of the use of natural forces to put rhythm into time and space. A real physical clock is to be found in the most far reached desire for regularity. But necessarily it starts off, fluctuates and comes to a standstill. It makes sounds, resonant or clear, never exactly alike. Just in the way that water never slides over the same pebble twice, in the same way, a pendulum or a bell hammer never finds exactly the same way.

Act III - Hyper-metric

(Without image)

A bell that is tapped, a string that is bowed, produce sounds which are themselves charged with a great internal richness. Especially when they are bodily controlled by man. But they are in essence metricless and barless. Yet, it is for that the measure or the metric, in the musical sense of terms, arises from another intention other than that analogical intention of expression. It arises from an intention to structure. It is without doubt the first step towards this. Both concerning the metrics of a musical scaling, or the metronomy of a beat, this intention implies calculation. The computer can now produce sounds and images with natural likeness. But it remains nonetheless master in the art of calculation.

(After A. Luciani)

Fig. 2.32 Programma di sala di Esquisses
(da CADOZ—LUCIANI—FLORENS, Physical Models for Music and Animated Image, p. 13).

Anche l'esperienza di Ludger Brümmer ben testimonia la fluidità che contraddistingue i modelli astratti del formalismo Cordis-Anima, che vengono impiegati dall'autore per esplorarne la dimensione multisensoriale, dapprima, nel brano *Thrill*, esclusivamente a livello audio, e successivamente, in *Le temps s'ouvre (Thrill)*, in collaborazione con Silke Braemer, in cui Genesis viene utilizzato come uno strumento multimodale per la produzione sia del suono, sia delle immagini animate usate come materia prima per la creazione di video post-trattati. L'autore pone in evidenza l'ambiguità che scaturisce a livello sonoro dall'uso della simulazione degli strumenti virtuali, così, *Thrill*, i cui suoni sono stati creati esclusivamente con modelli fisici, potrebbe apparire, come definisce l'autore stesso, 'uno strano tipo di musica concreta', poiché, da un lato, i suoni vengono sintetizzati da una macchina, ma, dall'altro, i modelli fisici agiscono analogamente a qualsiasi altra cosa esistente nel mondo secondo le leggi di Newton:

All the sounds should be considered to be true 'natural' and since they sound out of the speaker they are as well real - but artificial in the same moment. It is audible that the sounds have references to real existing sound phenomena. Some sounds like metal, or like a piece wood hit with a hard stick. Some sounds create as well a visual image. [...] The physical models created with Genesis focused on object with what I call "complex energy injection". Small vibrating objects with roughly 7 masses create a vibration with individual frequencies. Up to 5 of these objects with different vibrating conditions are created. The energy was fed into a single resonating object. This patch created complex and rich spectra. The patches could be seen similar to a Tam Tam which is bowed by several bows at the same time.¹²³

Come precisato dall'autore, una volta che tali oggetti virtuali sono messi in vibrazione, il risultato sonoro viene registrato e riprodotto attraverso gli altoparlanti. Per poter usare tali modelli in modo compositivo, la spazialità è stata aggiunta tramite il riverbero e l'eco, e la scalarità sonora grazie allo stretching ed ai cambiamenti di tono. Come risultato, emergono suoni che possono essere caratterizzati come naturali, ma, talora, possono sembrare, al contempo, strani e familiari.

Nel lavoro audio-video *Le temps s'ouvre*, creato come progetto indipendente sulla musica di *Thrill*, viene prodotto non solo il suono ma anche la visualizzazione dei processi energetici risultanti: il movimento innescato da un impulso di energia genera

¹²³ LUDGER BRÜMMER, *Nota dell'autore*, in <https://electrocd.com/en/oeuvre/20331/Ludger_Brümmer/-_Thrill> (accesso 20-11-2021).

un'animazione dalle straordinarie potenzialità motorie, evocando, in virtù della struttura basata sulla modellazione fisica, associazioni con fenomeni naturali di movimento. La neutralità dell'animazione si modella mediante il carattere fortemente espressivo dei corpi umani in movimento e viceversa. Da un lato, si sviluppano momenti di interazione, somiglianza e accordo, in cui la qualità del movimento dei due elementi si rafforza reciprocamente, dall'altro, i rispettivi linguaggi visivi e le qualità del movimento risultano, a volte, grandemente divergenti. Ciò che caratterizza il progetto, oltre alla fusione di animazioni modellizzate fisicamente con movimenti reali, è, però, l'uniformità del processo di progettazione di suono e di animazione: occhio e orecchio sono sollecitati, infatti, attraverso lo stesso mezzo, i modelli fisici. Il modello è la formulazione unitaria della *gestalt*, mentre è soltanto il mezzo-schermo o il mezzo-altoparlante a decidere quale tipo di percezione venga generata.¹²⁴

In *Résorption-Coupure* (2000), composizione elettroacustica a quattro canali di Hans Tutschku commissionata da Denis Dufour, un oggetto simile ad un arco, insieme ad oggetti di attrito e a martelli, eccita grandi strutture di risonanza definite in modo astratto. Il brano si costruisce mediante una dialettica tra riconoscimento percettivo e non identificazione degli oggetti sonori, un processo, questo, che si riflette nell'uso degli strumenti virtuali astratti (oggetti metallici simili a delle corde) e dei suoni del mondo fisico (sussurri e respirazione):

After composing *Eikasia*, based entirely on physical modelling using the program Modalys, I had the opportunity to take another approach to synthesis by physical modelling using Genesis, a Unix program by Acroe. The control of the synthesis is very different from Modalys: objects are not manipulated directly. Instead, the user controls interconnected masses and springs. Though fine control is harder, complex sound structures are easier to create.¹²⁵

Si vengono a creare, così, due grandi strutture risonanti eccitate da un oggetto simile ad un arco – con il risultato sonoro di infinite vibrazioni, dato che la perdita di energia dovuta all'attrito dell'aria e dell'oggetto può essere artificialmente azzerata –, oppure

¹²⁴ Cfr. *Elektroakustische Musik vom ZKM (Zentrum für Kunst und Medientechnologie Karlsruhe)* in <http://www.neue-musik-lueneburg.de/events_studienwoche_zkm_nacht.php> (accesso 06/01/2021).

¹²⁵ TUTSCHKU, *Portfolio of Compositions* cit., p. 15.

un martello con diverse teste, collegate da molle che ad ogni impatto sull'oggetto crea un diverso ritmo di vibrazione, oppure, infine, un comportamento non lineare dell'attrito tra due oggetti. Tali suoni vengono inseriti dal compositore nella trama dell'opera che formalmente si fonda su due aspetti temporali – la continuità e l'interruzione – adattando la continuità dei suoni sintetici alla natura dei suoni campionati, fino a tagliare i suoni sintetici in particelle molto piccole, il cui atto, nel corso della composizione, diventa continuo. Così, viene a crearsi una progressione formale nella combinazione dei materiali sonori: quelli più preminenti che sono risonanze metalliche sintetiche e suoni vocali, ed altri suoni che includono suoni ambientali, flauti, modelli fisici di corde e di membrane, sussurri e respiri.

Nel brano *pico..TERA* (2001), di Cadoz viene definitivamente sperimentata, grazie alla modularità di Cordis-Anima, la possibilità di estendere l'utilizzo delle relazioni gerarchiche tra qualsiasi componente della rete, da cui far emergere 'strumenti', 'esecutori' e 'direttore', oltre agli spazi di risonanza delle esecuzioni, simulati esclusivamente mediante la modellizzazione fisica, il cui formalismo, per la prima volta, struttura tanto la micro, quanto la macro-forma (§ 2.2.2.1):

Although the aim of this paper is to demonstrate that the physical modelling approach can be used even for compositional purposes (strictly speaking) we prefer to speak of musical creation or "construction" in this larger conception and envisage here the question of musical construction thanks to physical modeling. And in order to avoid another confusion, we insist on the fact that it is not the trivial question of musical composition using sounds obtained by physical models, but of the use of the physical model for the complete process of musical construction, from the microstructure (the sound material) to the macro-structure (the complete piece itself).¹²⁶

I 290 secondi di musica di questo brano sono generati, senza alcuna interazione con uno strumento esterno, né post-trattamento, da un' 'orchestra', un unico modello fisico complesso, composto da un insieme di strutture vibranti – simulatori di fiati, strumenti elaborati, strumentisti virtuali, 'direttori' e 'ascoltatori' che vengono assemblati e

¹²⁶ CADOZ, *The Physical Model as Metaphor for Musical Creation: "pico..TERA", a Piece Entirely Generated by Physical Model*, in *Proceedings of the International Computer Music Conference ICMC 2002*, MPublishing, Gothenburg 2002, pp. 305-312: 305.

combinati in varie situazioni interagenti all'interno di un unico ambiente performativo simulato – che realizza l'intera drammaturgia del brano:

Such a compositional process presents three major advantages. First, since low frequency models are slightly perturbed in a natural manner by retroaction from sound models, the sound events generated do present convincing short-term evolutions, expressiveness, and musicality, such as changes in a rhythm or in the timbre of successive musical events – somehow as a musician would do. Second, the process proves that physical modeling makes it possible to meld within a single paradigm both sound synthesis and computer-aided composition. Third, the compositional process is deeply transformed: the “think physical” dictum we discussed above may be extended to the compositional scale.¹²⁷

In tale processo compositivo, gli eventi sonori generati presentano evoluzioni efficaci ed espressive, che coinvolgono, ad esempio, cambiamenti nel ritmo o nel timbro degli eventi musicali che si succedono nel tempo. Si entra, dunque, in una dimensione della costruzione musicale del tutto inedita, che risponde a ciò che Cadoz definisce un *paradigm shift*, un cambiamento di paradigma che prevede non tanto il semplice comporre con i modelli fisici, ma il dare forma, attraverso i modelli fisici, al processo completo della costruzione musicale, dalla microstruttura (il suono materiale) fino alla macrostruttura (il brano completo).

Se, infatti, la forma complessiva corrisponde a una rete generale in cui ogni componente ha i propri valori di parametro, le proprietà intrinseche della struttura vibrante dipendono dalle sue due caratterizzazioni (la struttura di rete e l'insieme dei parametri) che, attraverso regole sofisticate, gestiscono grandi insiemi di elementi, i quali permettono di progettare macro-reti topologiche e macro-parametri. Pertanto, come osserva Cadoz, all'interno di tale mondo, sia i rapporti gerarchici, sia quelli non gerarchici, corrispondono tutti a una situazione naturale, dato che gli elementi sono sempre contraddistinti da una relazione bidirezionale:

This corresponds better to a natural situation in which the entities, even in a hierarchic relation, are always in bi-directional relation. The traditional musical thinking generally does

¹²⁷ CASTAGNÉ – CADOZ, *10 criteria for evaluating physical modelling schemes for music creation* cit., p. 3.

not envisage such interaction between elements at this time and structure scale. But it might be an inherent limit to the structuralism thought.¹²⁸

In *Gaea*, Cadoz implementa circa ventimila particelle materiali in interazione che costituiscono un micro-universo di oggetti fisici virtuali di diversa natura, dimensioni e scale: da semplici puntuali granelli di materia a immensi flussi e scosse telluriche. Tali oggetti sono organizzati in una sorta di orchestra di diverse decine di strumenti strutturati in strati sovrapposti in cui è possibile stabilire interazioni multiple, che generano suoni del vento, di onde e pioggia, di rimbombi tellurici, di tuoni ed esplosioni, ma anche di fruscii, di percussioni legnose, e di enormi corde ad arco.

Sebbene il brano non preveda interazioni in tempo reale, le nozioni di interazione ed enazione sono profondamente incluse nel processo di creazione dello stesso, come pure nella struttura e nei modelli fisici utilizzati per generarlo.¹²⁹ Per di più, Cadoz ha eseguito *Gaea* (2007) direttamente dal *workbench* della simulazione, navigando, contemporaneamente, nella visualizzazione del modello, in modo da guidare il pubblico in un viaggio immersivo durante l'ascolto, che segna un allontanamento dalla nozione di musica acusmatica, poiché il pubblico può effettivamente vedere una rappresentazione coerente degli strumenti con cui i suoni sono prodotti.

La fluidità degli oggetti e delle funzioni che danno vita a strutture astratte si ritrova anche nel brano di Kojas *At and Across* (2007),¹³⁰ per campane slovacche e campane cibernetiche, ottenuto mediante la modellizzazione di tutti gli elementi del fare musica quali la composizione, la direzione d'orchestra, l'esecuzione e gli strumenti, in cui il gesto si rivela centrale per la definizione, delle aree formali, strumentali, timbriche e ritmiche dell'opera. L'esecutore fisico viene così impegnato con un set di campanelli fisici e un'orchestra di campanelli virtuali, dando vita a una realtà musicale aumentata unica, data dalla combinazione delle campane slovacche fisiche con le strutture virtuali delle campane. Gli strumenti virtuali risuonano come unità singole o sono collegati in rete. I collegamenti in rete sono stati progettati per perturbare il comportamento naturale degli

¹²⁸ CADOZ, *The Physical Model as Metaphor for Musical Creation* cit., p. 308.

¹²⁹ Cfr. CADOZ, *Nota dell'autore su Gaea*, in https://zkm.de/media/file/en/programm_ambient_digital_creativity.pdf (accesso 06-01-2021).

¹³⁰ KOJAS, *Virtual Reality and Sonic Cyberspaces: Augmentation, Hybridisation and Abstraction*, «International Journal of Arts and Technology», VI (2013), pp. 167-180: 176.

strumenti risonanti, evitando il collasso delle loro strutture interne. Allo stesso tempo, le *cyber-bell* vengono utilizzate, non solo in funzione di strumenti sonori, ma anche come *cyber-performer* e *cyber-leader*. Le risultanti azioni astratte significano la trasmutazione delle energie nella creazione di specifiche tecniche strumentali:

The composition is a vibrating cyberbell structure that produces certain energy patterns depending on the excitation mode and place of excitation. That energy is transmitted and transduced to the conductor structure and then to the performance and instruments. (All of the structures are actually bells made of various sizes and materials.) The links between the components enable various types of energy transmission and transduction via bowing, plucking and hitting mechanisms. The links also facilitate bidirectional flow, perpetuating continuous feedback.¹³¹

Negli ultimi anni, le sperimentazioni e le creazioni musicali di ACROE hanno testimoniato quanto l'interazione aptica e la simulazione multisensoriale in tempo reale dei modelli fisici rappresentino le tecnologie di base per raggiungere l'*embodiment* nel contesto degli strumenti informatici, per la creazione musicale e artistica. In particolare, la tangibilità dei modelli, supportata da interazioni aptiche e multisensoriali di alta qualità, contribuisce ad un migliore *embodiment* nella composizione e nella performance musicale.

Le due composizioni di Cadoz *Hélios* e *Quetzalcóatl* sono state interamente create all'interno di *Hélicanthe*, che ha consentito la simulazione raffinata di oggetti fisici multisensoriali prodotti con *Genesis* e, nel contempo, l'interazione in tempo reale di due o tre strumentisti con sistemi di force feedback gestuali (Trasduttori Gestuali Retroattivi) in un dispositivo di proiezione multivideo (§ 1.3.2.1). In particolare, Genesis (G-IV) è dedicato alla modellazione in tempo reale con sistemi di feedback gestuale ad alte prestazioni mediante il principio di 'emulazione del gesto', che permette di creare e sperimentare off-line – in assenza di TGR e in tempo differito – modelli che possono funzionare on-line con tutte le prestazioni richieste. Alla dualità tempo reale/tempo differito, già sperimentata in *Hélios* si aggiungono in *Quetzalcóatl* nuove forme di dialettica tra gesti effettivamente eseguiti sulla TGR e gesti emulati costruiti in tempo

¹³¹ *Ivi*, p. 176.

differito, e tra due strumentisti che intervengono *online* e in tempo reale su due TGR separate ma accoppiate. La struttura macro-temporale di *Hélios*, risulta, dunque, dai movimenti, comportamenti e interazioni di due grandi modelli Cordis-Anima, entrambi creati con Genesis che hanno evoluzioni lente, della stessa natura di quelle dei gesti strumentali. La parte video, inoltre, è la visualizzazione 3D della scena dinamica dei modelli fisici in corrispondenza con la produzione del suono (§ 2.2.2.3).

Nei paragrafi seguenti, seguirà l'analisi dettagliata degli strumenti astratti schematizzati nella tabella 2.4.

Denominazione	Modello	Interfaccia	Tipologia di strumento
<i>Cel</i>	Struttura vibrante semplice	interfaccia grafica in Genesis	astratto
<i>Ring</i>	Struttura vibrante a forma di corda chiusa su se stessa e senza punti di attacco	interfaccia grafica in Genesis	astratto
<i>Triangle</i>	struttura vibrante triangolare al cui interno collidono liberamente particelle	interfaccia grafica in Genesis	astratto
<i>Beater</i>	struttura 'sovra-gestuale': serie di <i>plucking</i>	interfaccia grafica in Genesis	astratto
<i>Snake</i>	struttura 'sovra-gestuale': unico gesto ondulatorio	interfaccia grafica in Genesis	astratto
<i>Domino</i>	struttura 'sovra-gestuale': serie di impulsi a catena	interfaccia grafica in Genesis	astratto
<i>Leader</i>	struttura 'sovra-gestuale' gerarchica con funzione di coordinazione di sottostrutture	interfaccia grafica in Genesis	astratto
<i>Cyber-bell</i>	struttura di 'campana' a tre livelli funzionali omnidirezionali (oggetto vibrante, gesto, coordinazione degli eventi)	interfaccia grafica in Genesis	astratto
<i>Gong</i>	'sovrastuttura' vibrante metamorfica in <i>Hélicanthe</i>	controllo in tempo differito; controllo con dispositivi di force feedback (ERGON) per controllo in tempo reale	astratto
<i>Stratospheric Waves</i>	struttura 'sovra-gestuale': enorme corda a cui si 'attaccano' strumenti (un plettro o un dispositivo percussivo...) nello spazio virtuale, in <i>Hélicanthe</i>	controllo in tempo differito; controllo con dispositivi di force feedback (ERGON) per controllo in tempo reale	astratto
<i>Cosmic-Snakes</i>	struttura 'sovra-gestuale': semplici insiemi di particelle che	controllo in tempo differito; controllo con dispositivi di	astratto

	generano eventi percussivi in <i>Hélicanthe</i>	force feedback (ERGON) per controllo in tempo reale	
Gongs-Frères, Big-bang lunaire, Cosmic-snakes	strutture vibranti di natura molto varia (percussive, risonanti, multi-frammentate, etc) in <i>Quetzalcóatl</i> di Cadoz su <i>Hélicanthe</i>	controllo in tempo differito; controllo in tempo reale con un doppio sistema aptico (12 tasti della TGR); accoppiamento di TGR reale e TGR virtuale per suonare off-line, suonare on-line, suonare on-line insieme sulla TGR reale, e suonare insieme on-line con la TGR reale e quella emulata; accoppiamento virtuale di due TGR	astratto

Tab. 2.4 Tabella riassuntiva degli strumenti analizzati in 2.2.2

2.2.2.1 Beater, Triangle, Snake e Domino in Genesis

pico..TERA, composto da Cadoz nel 2001, è un brano di 290 secondi interamente generato da un'unica esecuzione (non in tempo reale) di un unico modello fisico complesso. Questo lavoro costituisce una testimonianza di quanto un brano musicale possa essere completamente creato, dalla micro alla macro-struttura, per mezzo di un formalismo di modellizzazione fisica che viene utilizzato non tanto per comporre con i suoni prodotti da quest'ultimo, quanto per la possibilità di strutturare, a partire da esso, ogni aspetto del processo compositivo, introducendo, in tal modo, un decisivo cambio di paradigma nella costruzione musicale.

Tutte le entità coinvolte sono state concepite e costruite grazie al formalismo Cordis-Anima e alla sua interfaccia grafica Genesis che generano una 'orchestra', composta da un insieme di strutture vibranti, 'simulatori di vento', strumenti complessi, strumentisti virtuali, 'leader' e ascoltatori che sono assemblati e combinati in varie

situazioni di interazione in una singola 'stanza', a costituire un vero e proprio teatro [fig. 2.30].¹³²

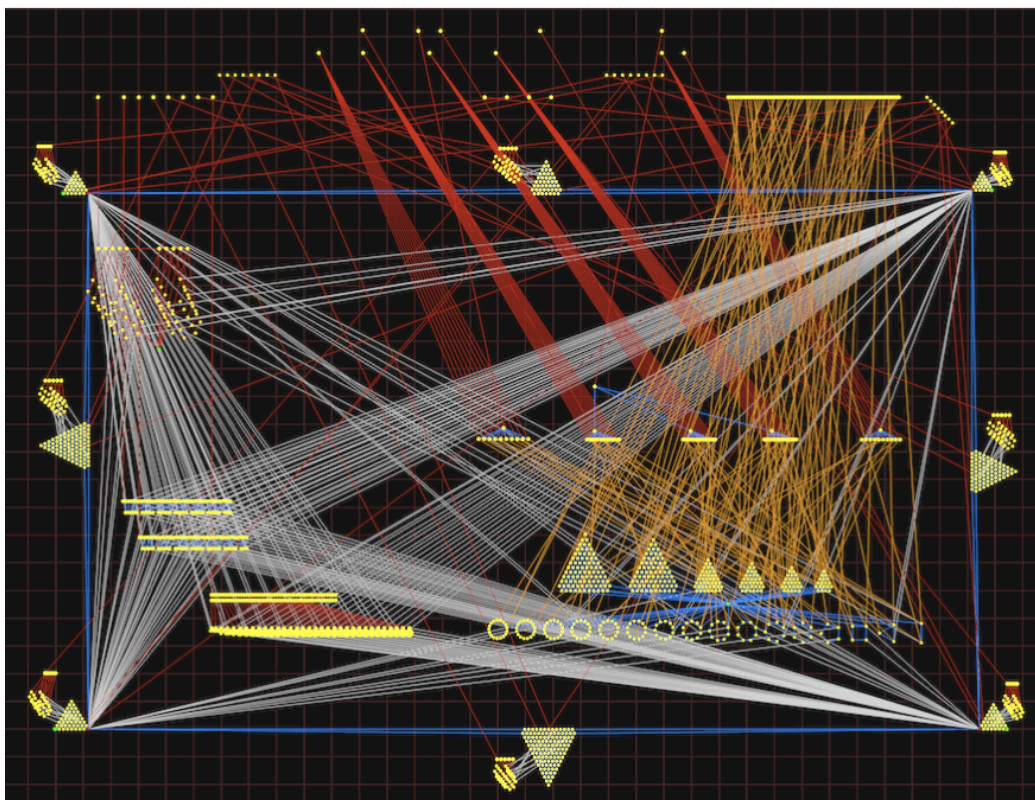


Fig. 2.33 Rappresentazione in *Genesis* di una complessa physically-based orchestra (da LEONARD – CADOZ – CASTAGNÉ – LUCIANI, *A Virtual Reality for Music Creation*, p. 271).

Tre livelli metaforici costruiscono, nella loro interrelazione, la totalità del brano. Un primo livello è rappresentato dalla modellizzazione delle strutture vibranti (VS), che costituiscono la base materiale del brano, costruite non tanto simulando un oggetto ben referenziato – quale, ad esempio, una corda costituita mediante l’assemblaggio in una linea di una serie di MAS-RES, e di conseguenza la caratterizzazione di un modello spettrale –, bensì indagando lo spazio timbrico dell’universo Cordis-Anima attraverso un’indagine pragmatica e sistematica focalizzata sulle proprietà topologiche di base delle reti VS, di cui si sono scelte le tre categorie che costituiscono il materiale di base

¹³² LEONARD – CADOZ – CASTAGNÉ – LUCIANI, *A Virtual Reality Platform for Music Creation*, in *Proceedings of the 10th International Symposium on Computer Music Multidisciplinary Research*, Marseille 2013, pp. 267-282.

del brano: il *cel* (il più semplice), il *ring* (che è una corda chiusa su se stessa e senza punti di attacco) e il *triangle*.

Le combinazioni e le interazioni delle strutture vibranti sono gestite a diversi livelli. Innanzitutto, si può pensare alla materia sonora, a livello di strutture vibranti, secondo le due opposte modalità di *contiguità* o di *non contiguità*. Possiamo dire, infatti, che una corda o qualsiasi forma vibrante sia un insieme di particelle collegate. Ne consegue, che esiste una differenza significativa, con ricadute a livello percettivo, tra strutture contigue e non contigue. Usando gli elementi Cordis-Anima in modo arbitrario possiamo usare BUT (modulo di interazione non lineare asimmetrica) invece di REF (modulo di interazione lineare) nella progettazione di VS. Fare ciò, all'interno di una struttura di corda fissata alle sue due estremità, equivale a racchiudere un insieme di particelle libere in una piccola scatola, le quali, se superiori a tre, generano movimenti erratici.

Tale approccio, definito *maracassing*, perché richiama lo strumento fisico delle maracas, è stato, dunque, utilizzato [fig. 2.31] per creare suoni di vento, attraverso due livelli annidati: una prima maracas è costituita da 8 particelle master e, a sua volta, ogni particella master è essa stessa costituita da una sub-maracas di 8 particelle più piccole. In questo modo, possiamo generare suoni rumorosi con due *scale di variazioni casuali*, una a livello audio e una a livello sub-audio, generando lente fluttuazioni erratiche nell'energia del segnale.

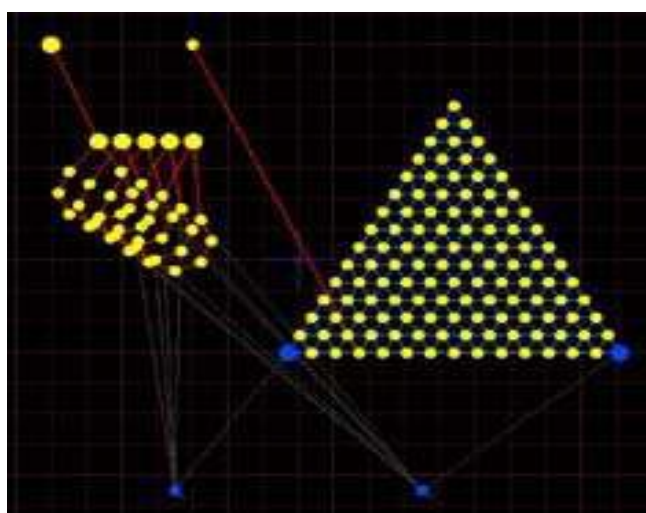


Fig. 2. 34 *Wind, maracas e triangle* (da CADOZ, *The Physical Model as Metaphor for Musical Creation: "pico..TERA"*, a Piece Entirely Generated by Physical Model, p. 307).

La costruzione delle strutture vibranti si completa con un'altra metafora costituita dalle due componenti ponte-tavola armonica. Attaccando più VS allo stesso ponte, si effettua la sommatoria dei fenomeni vibratorii, mentre la tavola armonica può essere costituita da una struttura qualsiasi progettata con modalità specifiche. In tale contesto, il ponte non è altro che la trasposizione dell'addizione del segnale dall'ambito della modellizzazione del segnale all'ambito della modellizzazione fisica.

L'ascolto degli strumenti creati e quindi la simulazione dell'ambiente nel quale il suono si propaga, se praticata come modellizzazione di una rete di particelle interagenti con i parametri appropriati, implicherebbe calcoli ingenti. Per questo motivo sono stati introdotti quattro ponti sulle membrane degli altoparlanti, visibili fisicamente, ai quali sono stati collegati tutti i punti o l'insieme di punti che si volevano ascoltare (dalle VS, i ponti o le tavole armoniche) con un elemento smorzatore con un valore molto basso, in modo da non modificare le proprietà degli strumenti. Grazie a questo espediente è possibile regolare le rispettive intensità attraverso parametri definiti. Allo stesso modo, è possibile inviare a questi ponti le vibrazioni di uno strumento '*free-floating*' (uno strumento senza punti fissi e che ha uno spostamento continuo nello spazio).

Poiché l'uso del Cordis-Anima non prevede, in *pico..TERA*, l'esecuzione in tempo reale, affinché gli strumenti simulati possano produrre suono è necessario un ulteriore livello metaforico: la rappresentazione dell'esecutore o, almeno, la rappresentazione del più semplice dei loro comportamenti fisici. Il primo elemento costituito da questo ulteriore livello è rappresentato dall'eccitatore: il martello del percussionista (o dello strumento percussivo), ad esempio, o qualsiasi altro oggetto che assicuri il legame energetico tra il gesto dello strumentista e la VS dello strumento. Essendo i movimenti meccanici di questi due sistemi in larghezze di banda esclusive (da 0 a meno di 20Hz per il primo e da più di 20Hz a 20KHz per il secondo), la trasmissione di energia dal primo al secondo – che, nel mondo reale, corrisponde alle categorie di base delle eccitazioni (colpire, pizzicare, scuotere e soffiare...) – necessita di un'interazione non lineare.

In particolare, per *pico..TERA*, sono stati realizzati due semplici modelli di interazione: colpire (realizzato con un BUT), e pizzicare (realizzato con un LNL). La qualità del suono della percussione con l'elemento BUT, quando l'inerzia del MAS-IST ('esecutore') è inferiore a quella del MAS-ENT ('strumento'), è interamente ed esclusivamente determinata dal modo di frequenza dell'oscillatore corrispondente al

MAS-IST/BUT durante la fase di contatto.¹³³ L'interazione prodotta dal pizzicato può produrre accuratamente i micro-contatti e i fenomeni di rimbalzo (e i corrispondenti effetti sonori) quando la corda (la VS) interagisce con il plettro.

Per quanto riguarda, invece, la metafora dello strumentista o, per meglio dire, la rappresentazione dei gesti all'interno di 'orchestra', sono presenti sia gesti elementari, sia gesti più articolati e dunque più significativi dal punto di vista della macro-struttura. Nei casi della rappresentazione di gesti strumentali elementari, lo strumentista può essere costituito da un singolo MAS che si muove da una certa distanza alla VS e che è collegato ad essa per mezzo di un eccitatore. Se l'elemento di collegamento è il BUT (percussione), la MAS raggiungerà la VS, rimanendo in contatto attraverso l'interazione della molla e dello smorzatore per un breve tempo, per poi rimbalzare dalla VS e tornare al punto di partenza. Se il link, invece, è un pluckLNL, la MAS raggiungerà la VS, interagirà e sposterà il punto di contatto della VS passandoci attraverso per continuare la sua corsa.

Secondo questa visione, si possono definire due primi elementi di un linguaggio gestuale nel contesto della modellizzazione fisica:

- l'energia del gesto;
- il tempo di azione del gesto.

Assegnando tali valori di energia e tempo di azione ad un insieme di MAS, che riprodurranno una sequenza di eventi, si genera, dunque, una partitura gestuale, attraverso la quale, non essendoci particolari limiti nella definizione delle distanze, è possibile decidere che un evento si verifichi, ad esempio, 10 minuti dopo l'istante 0 della simulazione. Naturalmente, il MAS 'strumentista' può essere inviato a qualsiasi MAS all'interno dello strumento complesso che si voglia suonare. Ad esempio, una singola corda o un *triangle* possono essere eccitati su uno qualsiasi dei loro elementi, producendo una variazione dei pesi relativi delle loro componenti spettrali.

A questi gesti elementari si affianca la costruzione di macro-eventi temporali complessi con reti di interazione MAS, al fine di creare gesti virtuali dalle proprietà più articolate e complesse. Posizione, movimento, velocità, inerzia, elasticità, viscosità e non

¹³³ PATRICK FOURCADE, *Étude et simulation des phénomènes percussifs dans les instruments de musique. Modélisation et simulation*, PhD. thesis, Université de la Méditerranée, Grenoble 2001; FOURCADE – CADOZ, *Physical Modeling for Sound Synthesis with Particle – Interaction Networks: Study of the Percussion Phenomena and Design of generic rules for Percussions*, in *Proceedings of the International Computer Music Conference (ICMC 2001)*, Havana 2001, [4 pp.].

linearità sono proprietà e stati che possono essere applicati a una grande varietà di entità, permettendo di modellizzare non solo suoni, bensì qualsiasi fenomeno dinamico prodotto da oggetti interagenti. Ne scaturisce, così, una serie di strumentisti virtuali, di cui i principali sono il *beater*, lo *snake* e il *domino*.

Il *beater* viene ottenuto assegnando a un oscillatore un parametro di elasticità (K) combinato con il parametro inerzia (M), in modo da ottenere una bassa frequenza all'oscillazione, per esempio 1 Hz. Dotato di un pluckLNL, questo oscillatore basso suonerà un plucking ripetitivo (beat-60) sulla VS a cui è collegato. Inserendo un valore non zero per il parametro di smorzamento Z , il *beater* dopo un po' di tempo si 'stancherà', smettendo di suonare.

Lo *snake* è costituito da una corda con masse pesanti e bassi parametri di rigidità che produce onde lente, le quali possono essere percepite nel loro insieme come un unico gesto ondulatorio che richiama le onde di un fenomeno naturale quali, ad esempio, il mare o un campo di grano esposto al vento. In tal modo, si è costruito un 'serpente' lungo il quale sono stati installati degli LNL pizzicati che agiscono sulle diverse corde di una 'cetra' [fig. 2.32]. Scegliendo accuratamente la corrispondenza tra segmenti successivi del serpente e corde della cetra si ottengono delle elaborate melodie.

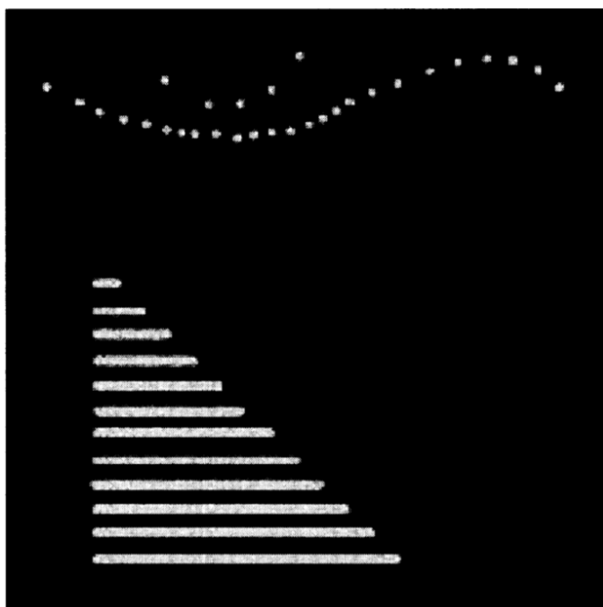


Fig. 2.35 Il macro-gesto *Snake* (da CADUZ, *The Physical Model as Metaphor for Musical Creation: "pico..TERA", a Piece Entirely Generated by Physical Model*, p. 309).

Il *domino* si ottiene sostituendo il REF all'interno del serpente con BUT, al fine di costituire una catena di MAS che collidono tra di loro. Partendo dalle masse in stato di riposo e colpendo la prima, si attiva un fenomeno a cascata in cui ogni MAS inizia a muoversi con un po' di ritardo rispetto al suo elemento contiguo. Una definizione ritmica, che va ad aggiungersi a quella melodica, può essere ottenuta regolando i diversi ritardi per mezzo del parametro di soglia dell'elemento BUT. In particolare, in *pico..TERA*, *domino* è stato usato per creare una raffica di suoni acuti, brevi e rapidi, in un glissando di altezze. A tal fine, si è creata una serie di anelli, di dimensioni crescenti (date dal numero di MAS negli anelli), eccitati con l'elemento percussivo BUT collegato, a sua volta, a ciascun elemento del *domino* [fig. 2.33].

Nella rete Cordis-Anima l'interazione fra 'esecutore' (gesto) e strumento non è unicamente di tipo gerarchico (non simmetrico), per cui il primo può suonare il secondo e non il contrario, ma, dato che, il contatto tra i due elementi implica inevitabilmente una modificazione tanto del modulo-strumento, quanto, inevitabilmente, dello stesso modulo-esecutore coinvolto nell'interazione, è possibile rappresentare interazioni di tipo simmetrico che implicano l'inversione dei ruoli. In tal senso, se un *beater* percuote una corda, la collisione tra MAS-IST e MAS-ENT modifica inevitabilmente il movimento del *beater* stesso, creando una relazione in cui lo strumento 'suona lo strumentista', modificandone, tra l'altro, il ritmo di pulsazione.

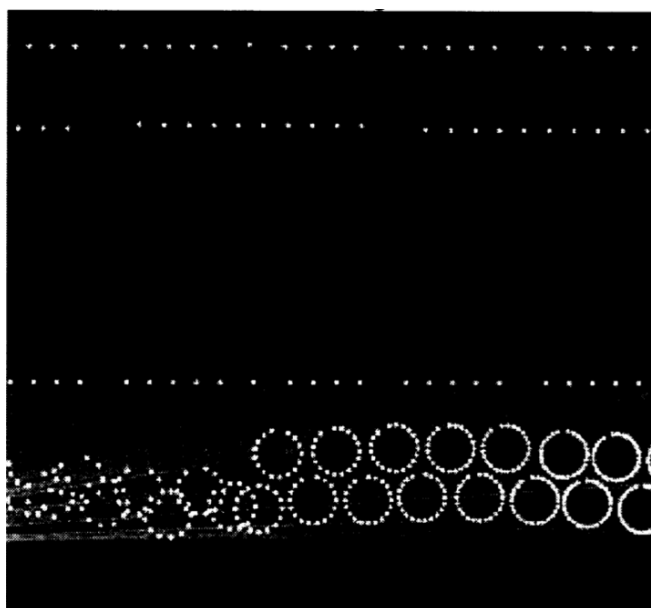


Fig. 2.36 Il macro-gesto domino Snake (da CADÓZ, *The Physical Model as Metaphor for Musical Creation: "pico..TERA", a Piece Entirely Generated by Physical Model*, p. 310).

Sebbene il pensiero musicale tradizionale non preveda generalmente tale interazione tra gli elementi in questa scala temporale e strutturale, l'interazione simmetrica di Cordis-Anima pare corrispondere, in modo molto più circostanziato, ad una situazione naturale in cui le entità, anche se gerarchicamente sovraordinate, sono sempre in relazione bidirezionale. La relazione strumento-strumentista deve essere, dunque, gestita in funzione del risultato musicale che ci si propone di conseguire. Ad esempio, all'interno di una relazione simmetrica tra i due elementi, si potrebbero semplicemente diminuire progressivamente i valori dei parametri nell'oscillatore del *beater* in modo da esaurirne l'energia vitale, arrivando naturalmente a smettere di suonare.

La complessità degli strumenti e delle gestualità rappresentate in *pico..TERA* si completano con un ulteriore livello gerarchico, un 'leader', necessario a coordinare le gestualità all'interno di 'orchestra'. Un 'leader' è, nella sua declinazione più semplice, un MAS, almeno cento volte più grande dello strumentista che dirige, il quale viene semplicemente lanciato da una distanza adeguata verso lo strumentista stesso. Ad esempio, il leader MAS collegato con un BUT al violinista MAS lo colpirà in un momento che dipende dalla differenza delle loro rispettive posizioni iniziali e lo farà iniziare a suonare proprio in quel determinato momento.

Il *leader* funziona allo stesso modo, sebbene a un livello gerarchico superiore, di uno strumentista elementare che colpisce uno strumento. Così, anche a tale livello, è possibile concepire un'organizzazione gerarchica più complessa, che implichi differenti e inedite possibilità, dalle più elementari e sovraordinate (una stretta gerarchia tra il leader e gli strumentisti o tra i diversi leader, o anche leader di leader), a quelle più complesse in cui gli strumentisti possono anche dirigere i leader.

Il modello fisico 'orchestra', utilizzato in *pico..TERA*, offre, dunque, nuove modalità di strutturazione complessa che consentono di instaurare una stretta correlazione tra i diversi livelli gerarchici – strumento, gesto, leader – per permettere la gestione interattiva degli incroci tra le diverse scale, scale che, a loro volta, possono essere pensate in termini di strutture temporali, fenomenologiche o causali.

2.2.2.2 Cyber-bell in Genesis

La *cyber-bell* è un altro strumento astratto, costruito in Genesis da Koj, che ben sfrutta le possibilità del formalismo Cordis-Anima, costruendo, attraverso un'unica struttura, una serie di funzionalità e possibilità altre. Il compositore è partito da un set di otto campane slovacche accordate sul modo misolidio di sol, che è il modo melodico predominante nella musica popolare slovacca. Il comportamento spettrale di queste campane di ottone è caratterizzato da una forte frequenza fondamentale e da un numero ridotto di parziali che decadono rapidamente. La frequenza di risonanza dominante dell'altezza più grave della scala è sol4 (784Hz), mentre la risonanza predominante della nota più acuta è sol5 (1568Hz). Un singolo colpo sul bordo della campana, il luogo di eccitazione più risonante, produce un suono dall'attacco penetrante che si attenua entro due secondi circa.¹³⁴

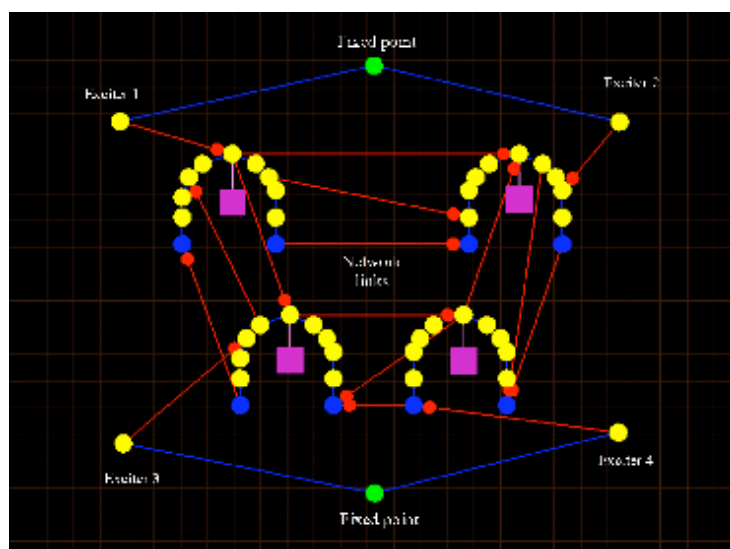


Fig. 2.37 Una rete di quattro cyber-bells colpita da quattro eccitatori in luoghi diversi (da Koj, *Cyberactions and Cyberinstruments via Physical Modeling Synthesis: Extending Musical Realities*, p. 141).

La progettazione virtuale ha avuto come prima finalità l'imitazione delle campane fisiche mediante un algoritmo massa-molla-ammortizzatore in Genesis. Il modello consiste di undici masse di diverso peso, che diminuiscono simmetricamente man mano che si allontanano dal punto centrale, connesse con collegamenti di valori di

¹³⁴ KOJ, *Cyberactions and Cyberinstruments via Physical Modeling Synthesis* cit., pp. 138-147.

smorzamento e viscosità variabili e generalmente bassi. La *cyber-bell* è replicata undici volte e sintonizzata su undici diverse fondamentali, che sono in relazione tra loro secondo le proporzioni proposte da Risset, nella sua sintesi additiva di una campana, le quali rimangono costanti per tutta la composizione (§ 3.5.2). Le *cyber-bell* possono risuonare sia quali unità singole, sia essere collegate in rete. I collegamenti in rete sono stati progettati per perturbare il comportamento naturale degli strumenti risonanti [fig. 2.34].

Gli eccitatori sono stati modellizzati come una combinazione di masse attaccate a punti fissi e a collegamenti lineari e non lineari. Per eccitare le campane virtuali sono stati usati meccanismi di percussione, di pizzicato, di sfregamento con archetto e di soffio. Per estendere le possibilità del mondo fisico, le campane sono state esposte a situazioni di eccitazione non realistiche, come, ad esempio, eccitatori multipli di vario tipo che agiscono sullo stesso punto di una singola campana e singole percussioni e sfregamenti con archetto che agiscono su più strumenti. Per esempio, un singolo eccitatore costituito da un archetto sollecita la campana in undici punti diversi. Ciascun archetto ha una configurazione parametrica leggermente diversa, così come le posizioni dei microfoni virtuali possono essere modificate, mentre tutti gli altri parametri sono stati mantenuti fissi. I quattro altoparlanti virtuali riproducono il suono della campana in quattro punti diversi, suggerendo un ascolto a 4 canali [fig. 2.35].

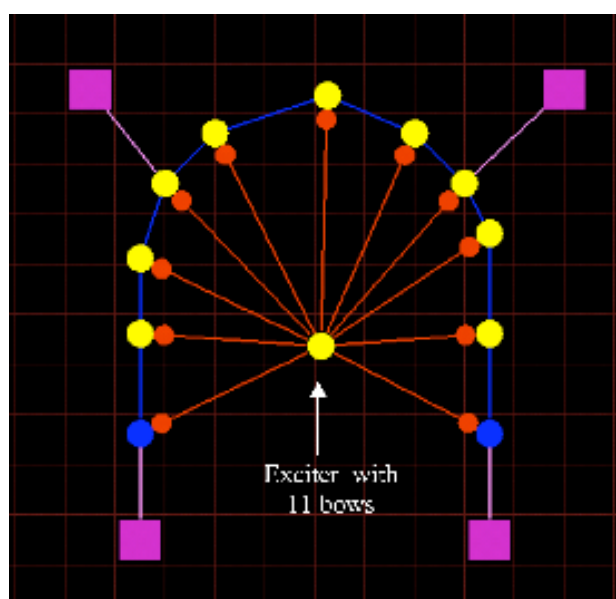


Fig. 2.38 Forza singola che inarca il cyber-bell in undici punti diversi (da Kois, *Cyberactions and Cyberinstruments via Physical Modeling Synthesis: Extending Musical Realities*, p. 142).

Grazie al formalismo Cordis-Anima in Genesis, in cui è possibile progettare interazioni tra *cyber-action* e *cyber-instrument*, la struttura della *cyber-bell* si basa sull'annidamento di due campane virtuali: la campana che costituisce lo strato esterno dello strumento è composta da materiali più densi, mentre la struttura centrale è composta da molle sottili con bassa rigidità. Le collisioni tra questi due strati creano una struttura virtuale astratta vibrante. Tale struttura – che, sebbene possa propagarsi con il movimento, non suona mai – è dotata di undici braccia che eccitano le undici *cyber-bell* sonore. La struttura astratta consiste, dunque, di tre strati: la campana come 'direttore d'orchestra' (strato superiore), l' 'esecutore' (strato intermedio) e lo 'strumento' (strato inferiore), [fig.2.36]. Le singole masse dello strato superiore eccitano l'esecutore, che trasferisce l'energia allo strato inferiore risonante. Poiché i collegamenti tra gli strati possono essere bidirezionali, la gerarchia tra i componenti del modello può diventare ambigua. In questo caso particolare, l'orientamento dei collegamenti suggerisce che l'esecutore suona sia lo strumento che il direttore d'orchestra.

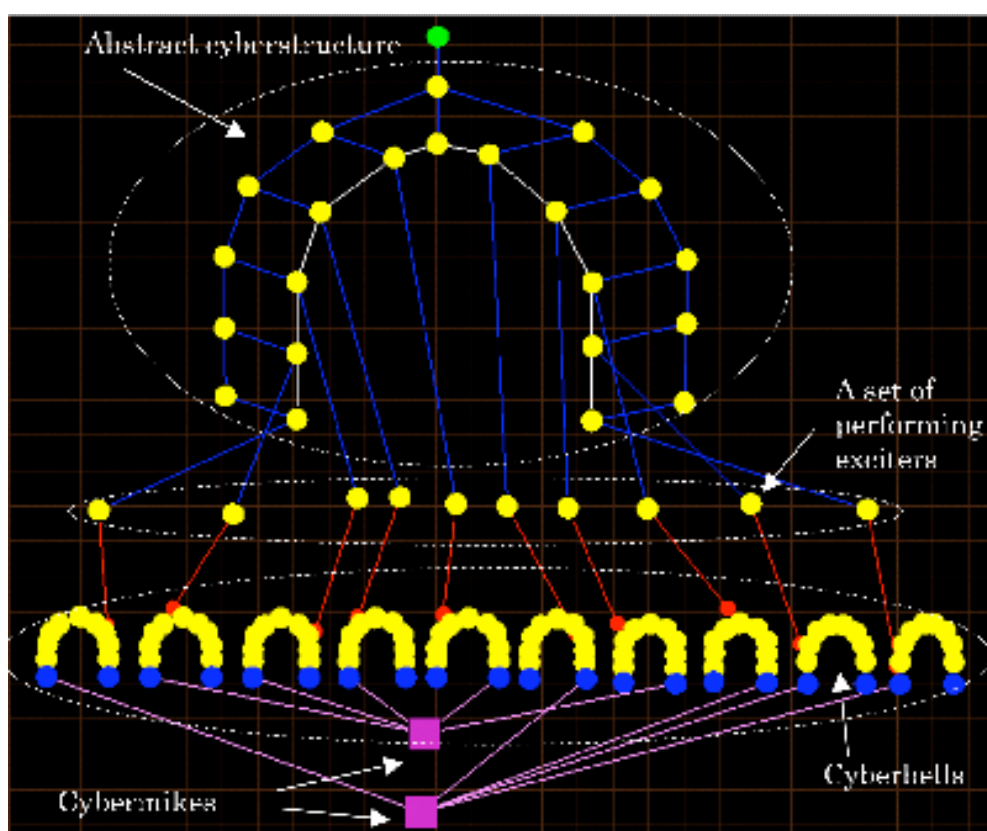


Fig. 2.39 Struttura astratta di campane che funzionano come direttore d'orchestra (strato superiore), esecutore (strato centrale) e strumento (undici campane in basso) (da Kois, *Cyberactions and Cyberinstruments via Physical Modeling Synthesis: Extending Musical Realities*, p. 143).

2.2.2.3 Gong, piatti, corde, flussi di particelle in Hélicanthe

Hélios è un'opera multisensoriale interamente creata all'interno di Hélicanthe,¹³⁵ piattaforma interattiva, in tempo reale, che integra le cinque tecnologie fondamentali sviluppate da ACROE in uno strumento completo di creazione musicale e multisensoriale (§ 1.3.2.1). L'architettura di Hélicanthe, utilizzata per la progettazione di *Hélios*, consta di una cupola sonora con 24 altoparlanti distribuiti su una semisfera di 10m di diametro, e di due grandi schermi, uno per la scena visiva su larga scala, l'altro, semitrasparente, posto di fronte alla stazione ERGON e al suo esecutore, per visualizzare la scena visiva della simulazione in tempo reale, fatta con TELLURIS. Il pubblico non è di fronte agli altoparlanti ma è immerso al loro interno in uno spazio musicale tridimensionale, basato sulla spazializzazione degli strumenti, piuttosto che dei suoni.

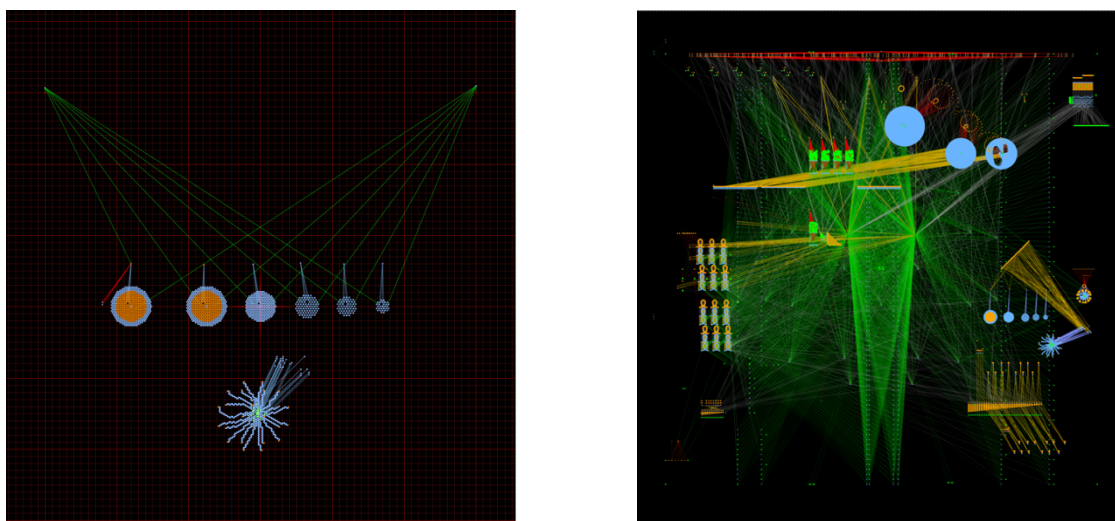


Fig. 2.40 A sinistra, parte in tempo reale (8.000 moduli); a destra, parte a tempo differito (120.000 moduli); (da CADOZ, Concepts and Technologies for Multisensory and Interactive Simulation of Pysical Objects, p. 33)

L'opera completa è composta da due grandi modelli Cordis-Anima, entrambi creati con Genesis. Uno è per la parte dal vivo suonata con dispositivi di forza gestuale (ERGON), che comprende circa 8.000 moduli [Fig. 2.37 (sinistra)], e l'altro per la scena principale (MASTER), calcolata in tempo differito, che comprende 120.000 [Fig. 2.37 (destra)] moduli corrispondenti a circa 40 diversi strumenti indipendenti – cioè insiemi di moduli

¹³⁵ *Hélios* è stato presentato per la prima volta a Grenoble, nel novembre 2015, nell'ambito del concerto di chiusura del progetto europeo EASTN (European Art Science and Technology Network).

che producono ciascuno suoni con un loro proprio carattere e che non interagiscono tra di sé – quali, ed esempio, gong, piatti, corde, flussi di particelle, ecc. Alcuni di essi risultano essere molto vicini a strumenti reali, mentre altri, sebbene fisicamente coerenti, non potrebbero essere realmente costruiti.¹³⁶

La parte differita nel tempo è precalcolata. Tutti i suoni sono registrati in un numero congruo di canali audio, e tutti i movimenti di tutte le particelle sono, a loro volta, registrati in uno spazio virtuale 3D all'interno del quale, durante la visualizzazione finale, in sincronia con la performance dal vivo e in tempo reale, è possibile navigare tra le particelle in movimento. La parte video è costituita dalla visualizzazione della scena dinamica 3D dei modelli fisici mentre producono il suono. Gli strumenti della parte in tempo reale sono presenti anche nel master, al fine di consentire una dialettica tra la parte precalcolata, e la parte live suonata in tempo reale [fig. 2.38]. Ne consegue che un modello viene suonato con dispositivi di force feedback per la parte dal vivo, e l'altro, per la scena master, è calcolato in tempo differito.



Fig. 2.41 L'ACROE-TGR in *Hélios* (da CADOZ, *Concepts and Technologies for Multisensory and Interactive Simulation of Pysichal Objects*, p. 33)

Tra quelle che Cadoz definisce sovrastrutture vibranti è particolarmente interessante osservare la trasformazione metaforica cui è sottoposto l'archetipo del gong: dal *Big gong*, al *Gong powder*, passando per il *Torn gong* e il *Gong burst*, fino ad arrivare, con un processo inverso, al *Riemann gong*.

¹³⁶ Cfr. CADOZ, *Concepts and Technologies for Multisensory and Interactive Simulation of Pysichal Objects. Application to Hélios, a Musical and Visual Artwork for the Hélicanthe Platform of the ACROE*, in *Proceedings of the 15th Sound and Music Computing Conference (SCM 2018)*, Limassol 2018, pp. 18-41.

Il *Big gong* è composto da circa 20.000 moduli disposti su una piastra circolare, secondo una topologia a maglia triangolare, eccitata da una particella proiettata verso un punto della sua superficie. L'intensità delle vibrazioni dipende direttamente dalla velocità con cui la particella è stata lanciata, mentre le diverse modalità di vibrazione dipenderanno dal luogo di impatto nella superficie [fig. 39a-b].

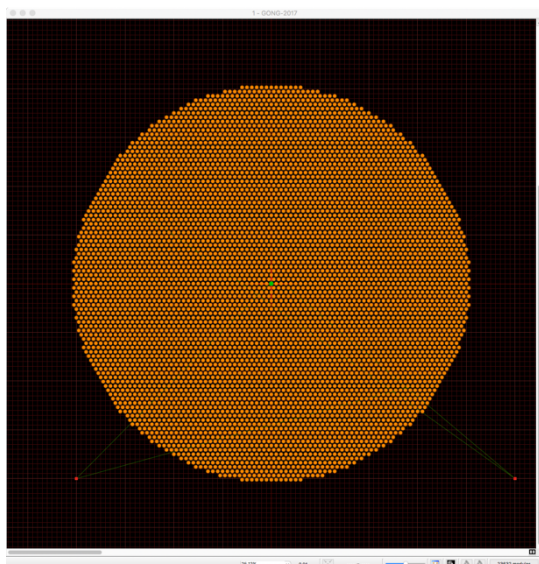


Fig. 2.39a

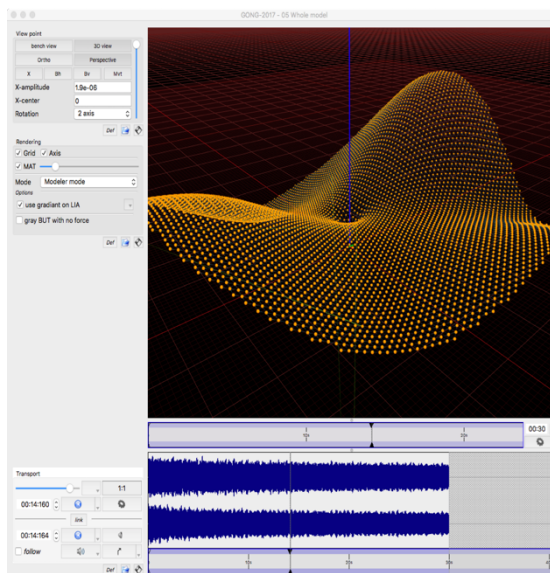


Fig. 2.39b

Fig. 2.42a-b a) *Big Gong* in *Hélios* (23,632 modules), b) *Modal shape* del *Big Gong* in *Hélios* (da CADOZ, Concepts and Technologies for Multisensory and Interactive Simulation of Pysical Objects, p. 34)

Il *Torn gong*, poi, è ottenuto dalla rimozione di alcune parti del *Big gong*, come se queste ultime fossero state divorate dagli acari. Un tale processo impossibile da ottenere nel mondo reale, poiché gli acari non mangiano il metallo, porta a risultati sonori assolutamente inediti, che implicano sia il mantenimento di molte delle componenti modali del gong iniziale, sia la modificazione della collocazione spettrale di alcuni di loro [fig. 2.40].

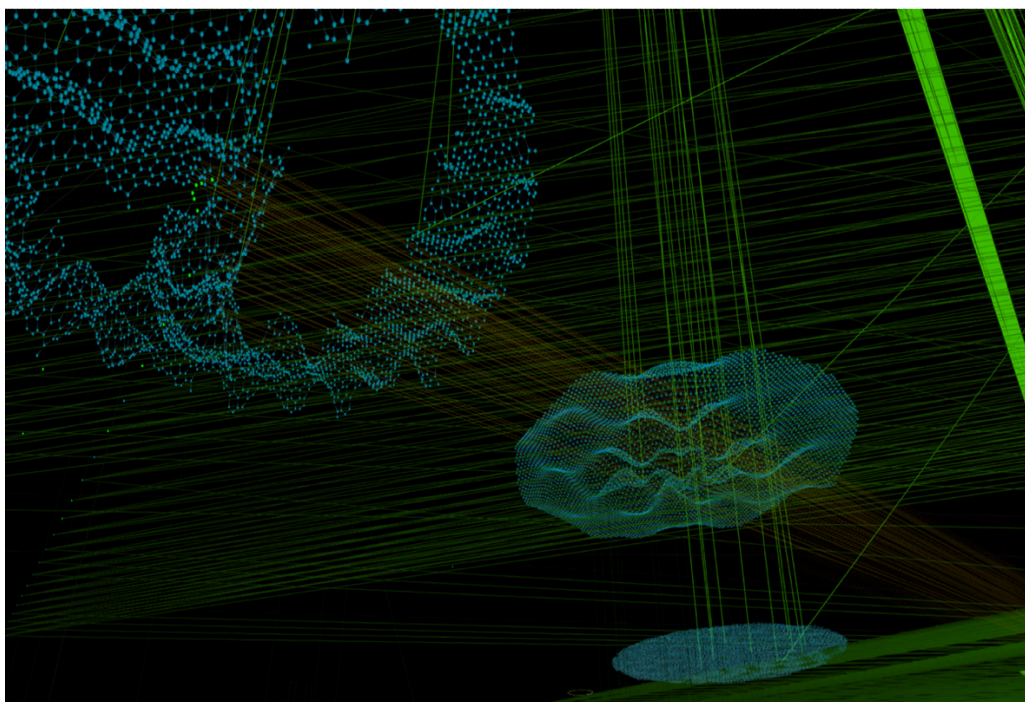


Fig. 2.43 'Cousin' gongs integrati e mangiati dagli acari (da CADOZ, Concepts and Technologies for Multisensory and Interactive Simulation of Pysichal Objects, p. 34)

Il processo di disintegrazione prosegue nel *Gong burst*, in cui lo strumento è frammentato in diversi pezzi, fino alla trasformazione metaforica, che arriva al suo traguardo finale con il *Gong powder*, in cui il gong viene decomposto in piccole celle vibranti elementari costituite da un solo moto vibratorio. La sintonizzazione in frequenza della struttura è stata realizzata attraverso l'analisi modale completa del gong iniziale, al fine di creare tante celle quanti sono i modi e, conseguentemente, accordarle alle frequenze risultanti dall'analisi [fig. 2.41a-b].

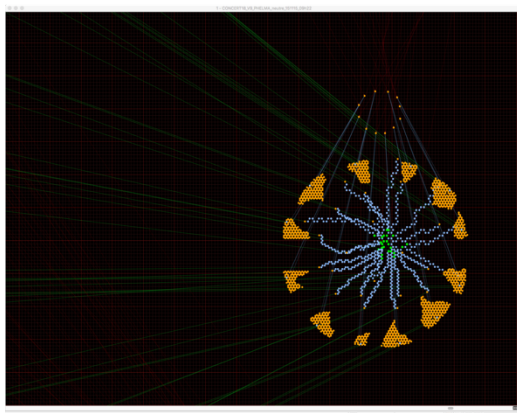


Fig. 2.41a

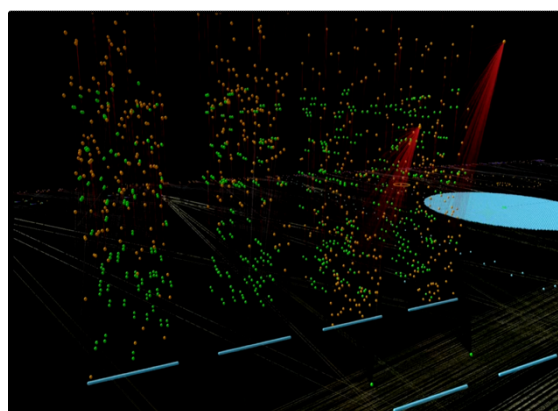


Fig. 2.41b

Fig. 2. 44a-b a) Gong burst; b) Gong powder (da CADOZ, Concepts and Technologies for Multisensory and Interactive Simulation of Pysichal Objects, p. 36)

L'ultimo atto nella trasformazione del gong, il *Riemann gong*, procede non più per decomposizione, bensì per sovra-composizione. Due gong vengono sovrapposti in maniera speculare: entrambi vengono divisi lungo un raggio e poi uno dei bordi risultanti da questa fessura, sul primo gong, viene cucito con il bordo opposto sull'altro gong. Al contrario, i due bordi lasciati liberi vengono cuciti a loro volta. Le proprietà acustiche di questo oggetto sono del tutto inedite perché, pur conservando le qualità sonore del gong originale, introducono il raddoppio di queste un'ottava sotto, conferendo, così, spessore al suono [fig. 2.42].

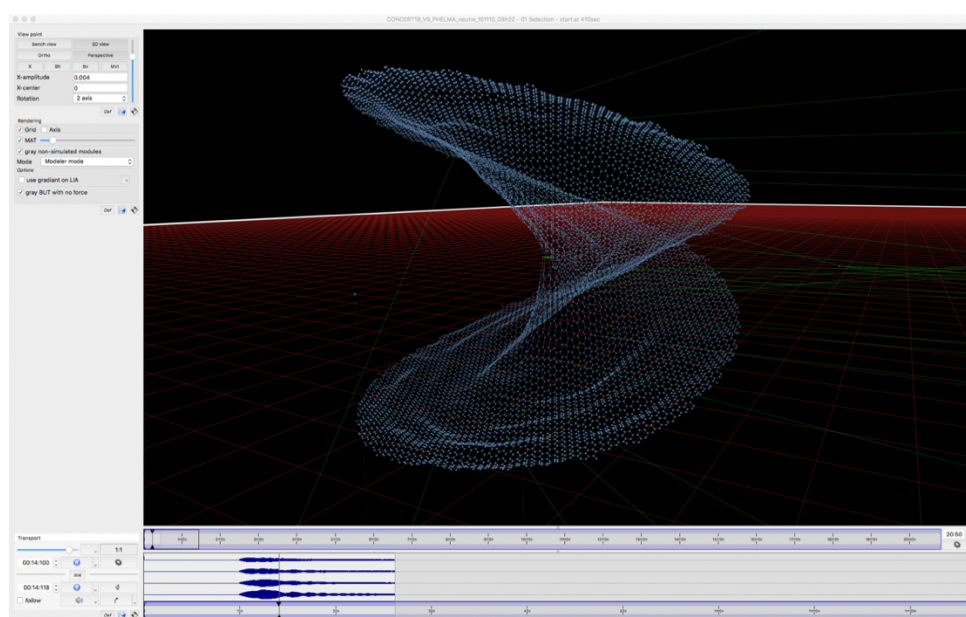


Fig. 2.45 *Modo fondamentale grave del Riemann Gong*, (da CADIZ, Concepts and Technologies for Multisensory and Interactive Simulation of Pysical Objects, p. 36)

A questi oggetti dalle ricche proprietà modali vengono implementati processi che producono risonanze che emergono e scompaiono, oppure si combinano. Ognuno di questi oggetti, infatti, può essere suonato facendolo vibrare per mezzo di una semplice percussione prodotta da una particella intrappolata in una cavità, e lanciata ad una velocità iniziale tale da farle compiere rapidi percorsi avanti e indietro, entro i limiti della cavità medesima. La particella adotta, così, un movimento 'triangolare', spettralmente ricco. Col mutare la dimensione della cavità, la frequenza di questa oscillazione triangolare viene modificata.

Le strutture 'sovra-gestuali' scaturiscono dalla *tecnica di simulazione multifrequenza*, che consente di suddividere il modello in diverse parti che saranno

simulate a diverse frequenze, adattate alla larghezza di banda dei loro comportamenti fisici. La simulazione a bassa frequenza di campionamento corrisponde alla larghezza di banda dei fenomeni gestuali. I *Serpenti cosmici* sono costituiti da semplici insiemi di particelle, le cui altezze sono regolate da precise regole, che condividono la medesima velocità iniziale al fine di generare una serie di eventi percussivi, anche ad intervalli regolari laddove siano state collocate su di una scala di altezze regolari. Tali particelle, possono anche impattare su qualsiasi struttura vibrante – come, ad esempio, i gong – eseguita con una gestualità che segue la forma dello strumento. Le *Onde stratosferiche*, a loro volta, sono il prodotto di una catena di masse collegate da elementi di interazione visco-elastica costituita con parametri che le conferiscono modalità vibratorie di bassa frequenza, che le consentono di comportarsi come un'onda lenta [fig. 2.43]. Ad ogni componente di tale oggetto, che esorbita da un equivalente reale, si può attaccare un plettro o un dispositivo percussivo, che consente di suonare questa enorme corda, propagando lentamente, in tal modo, la sua onda coinvolgendo tutti gli strumenti che entrano nel suo raggio di azione, come avviene, ad esempio, nell'ultima sequenza di *Hélios*, in cui l'onda suona una melodia che scaturisce dal suo incontro con una serie di strumenti.

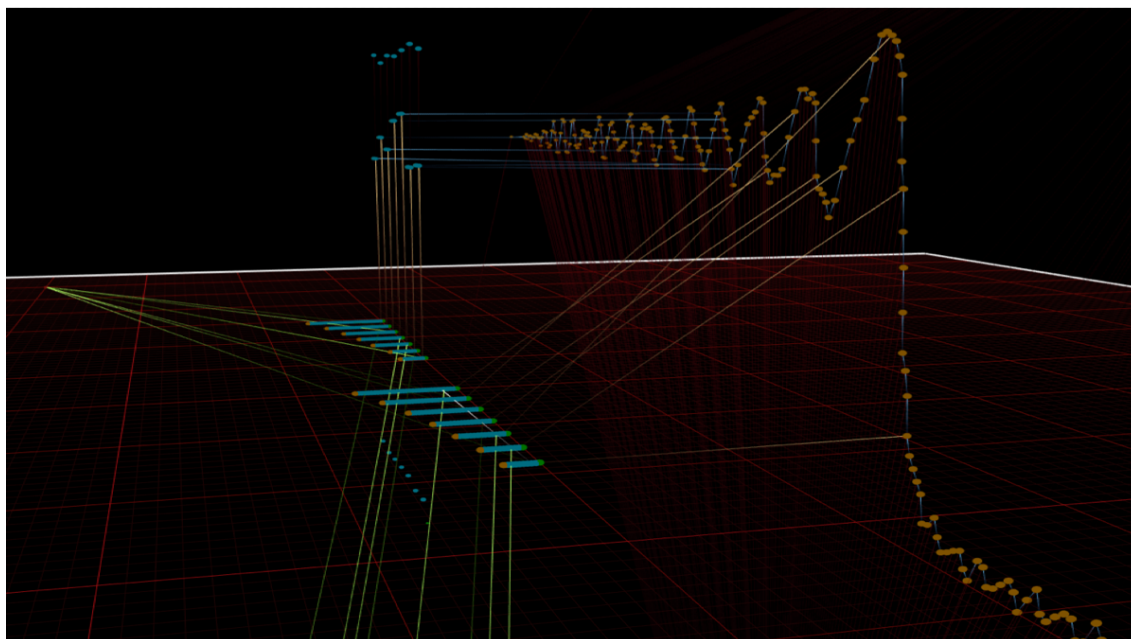


Fig. 2. 46 *Onde stratosferiche* (da CADOZ, *Concepts and Technologies for Multisensory and Interactive Simulation of Pysical Objects*, p. 38)

L'ultima composizione di Cadoz, *Quetzalcóatl*,¹³⁷ interamente concepita nella piattaforma *Hélicanthe*, presenta tutte le tecnologie di ACROE, mostrando un doppio sistema aptico, strumenti fisici virtuali 3D immersivi e 'orchestra' [fig. 2.44a-b]. *Quetzalcóatl* ci immerge, attraverso l'udito e la vista, in enormi universi onirici come *Gongs-Brothers*, *Lunar Big-bang*, o *Cosmic-snakes* costituiti da materiali sonori di natura molto varia, percussivi, risonanti, multi-frammentati, etc.¹³⁸ Il brano implementa una prima forma di dualità, già sperimentata in *Hélios*, tra un modello Cordis-Anima molto grande – composto da più di 230.000 moduli, simulati in tempo differito – e una sottoparte di tale modello simulata e controllata da un doppio sistema aptico (12 tasti della TGR) in tempo reale. Durante la performance, la parte precompilata viene trasmessa sui 24 canali audio di una cupola sonora, in sincronia con la visualizzazione dei movimenti 3D di tutti i moduli <MAT> che compongono la rete. Genesis permette una navigazione interattiva in tempo reale all'interno della scena 3D visualizzata, la quale viene suonata dal vivo da due strumentisti su due TGR che sono accoppiate, permettendo agli strumentisti di suonare insieme su uno strumento virtuale condiviso mentre, al contempo, sentono i gesti dell'altro [fig. 2.45].

Il modello non in tempo reale è composto da un primo insieme di strutture vibranti, costituite da 10.000 oscillatori indipendenti, le cui posizioni sono allocate in modo casuale su una gamma di frequenze da 20Hz a 10KHz. Una seconda serie di strutture vibranti è composta da moduli <MAT> interconnessi. Per esempio, c'è un gong, modellizzato come un disco a maglia esagonale, i cui nodi sono moduli MAS e archi collegati da REF viscoelastici e non lineari, che si trovano nelle superfici sottili e che sono la causa dell'evoluzione verso il caos nei gong o nei piatti reali.

¹³⁷ PRIMA ESECUZIONE ASSOLUTA 10 novembre 2018, Micro-Music, Festival, Romans, EASTN-DC European Project led by ACROE.

¹³⁸ Cfr. CADOZ, *Genesis 4th Generation / Nomadcity / Gesture Emulation. Real-time Cordis-anima Physical Modeling and High Performance Force-feedback Interaction within the Hélicanthe Workstation*, in *Proceedings of the 17th Sound and Music Computing Conference*, Torino 2020, pp. 308-315.

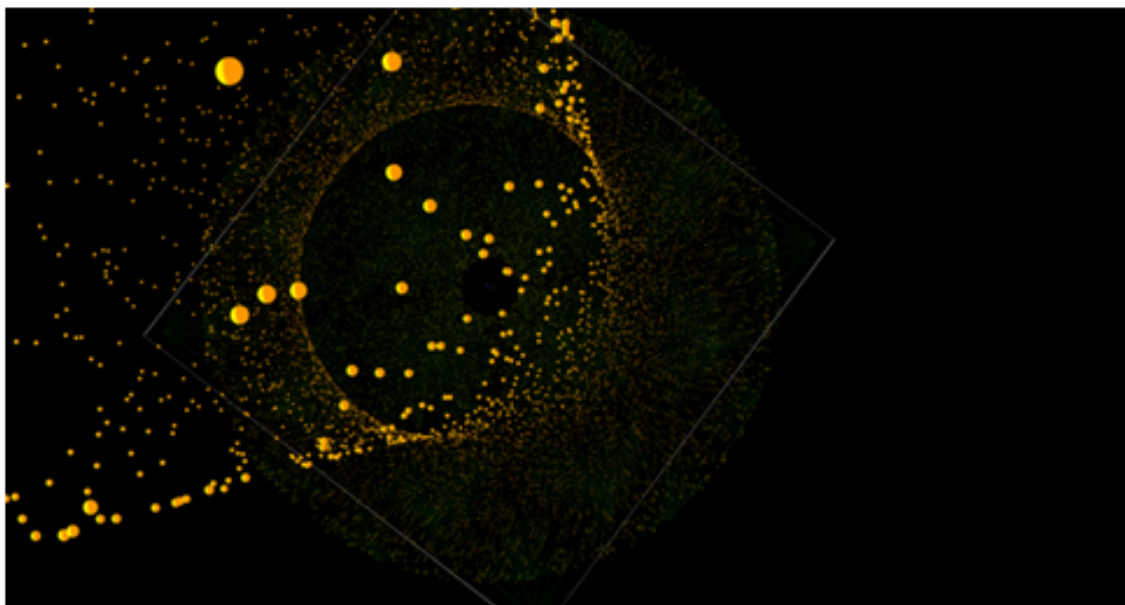


Fig. 2. 47a

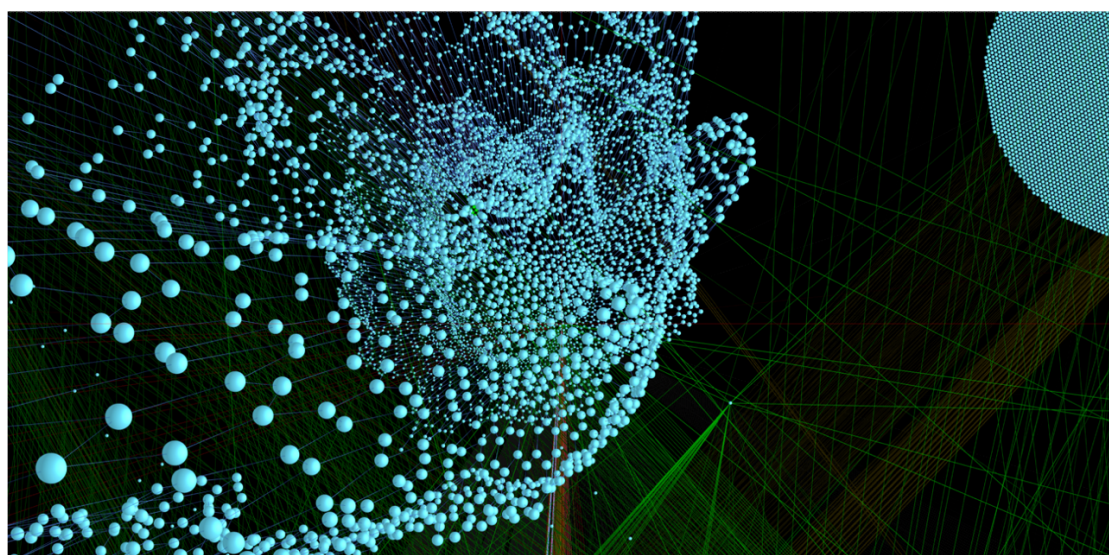


Fig. 2. 44b

Fig. 2. 44a-b Visualizzazione della simulazione in Quetzalcoatl. Le particelle gialle sono 'ergoni' (particelle che hanno un'inerzia molto piccola e un'alta velocità), quelle blu sono i 10.000 oscillatori indipendenti (da CADOZ, Genesis 4th Generation / Nomadcity / Gesture Emulation, p. 314).

La proiezione del suono nello spazio avviene per mezzo di un emulatore della cupola sonora, che consta di 24 moduli SOF8 disposti sul workbench in posizioni isomorfe con gli altoparlanti nell'auditorium. Ognuno dei 10.000 oscillatori è collegato al modulo SOF a cui è più vicino. Tutto avviene quindi come se un enorme piatto (o una minuscola galassia) di oscillatori, le cui altezze più basse appaiono sulla circonferenza, le più alte verso il centro (sul bordo del buco nero) fosse collocato sopra le teste degli

ascoltatori. La stessa disposizione è adottata per il gong ma, questa volta, non sono le altezze ad essere proiettate nello spazio, ma i luoghi di impatto su tale *Gong-Dome*.

Una seconda forma di dualità detta *Specular Instrumentality* consente il realizzarsi di un ampio spettro dialogico: dalla ri-progettazione di una performance reale precedentemente realizzata, alla progettazione di una narrazione gestuale per anticipazione, a un possibile dialogo tra entrambe. Poiché il suonare in tempo reale è morfologicamente possibile solo su oggetti a dimensioni umane, è stato necessario progettare un emulatore di TGR gestuale da impiegare sugli enormi modelli non in tempo reale che avesse esattamente le stesse proprietà fisiche di quello reale. Così facendo, risulta possibile suonare off-line, suonare on-line, suonare on-line insieme sulla TGR reale, e suonare insieme on-line con la TGR reale e quella emulata.

La terza forma di dualità, chiamata *Inter-Instrumentality*, consiste nell'accoppiare virtualmente due TGR, con modalità sia semplici, sia complesse. Così, il gesto di uno strumentista può essere sentito dall'altro [fig. 2.45]: un esecutore, infatti, può essere gestualmente assecondato oppure contraddetto dall'altro esecutore. Una tale cooperazione gestuale, al di là della abituale interazione mediata dal suono, produce una situazione del tutto nuova, che è impossibile possa avverarsi nel mondo reale.

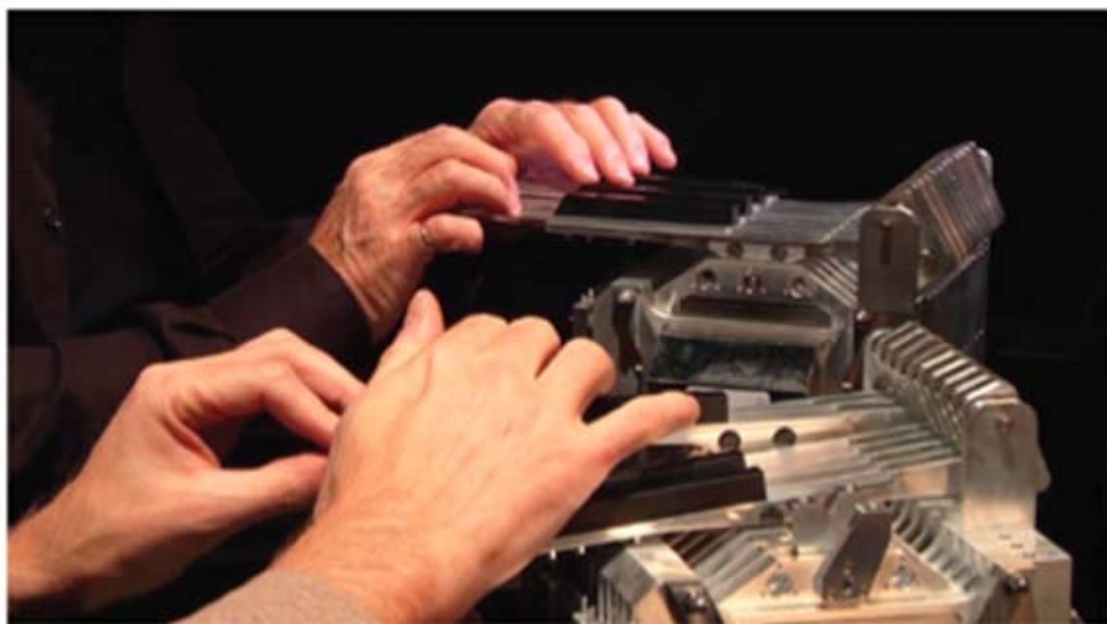


Fig. 2.45 *Interstrumentalità* in Quetzalcóatl (da CADOZ, *Genesis 4th Generation / Nomadcity / Gesture Emulation*, p. 314).

2.3 Conclusioni

Grazie alla diffusa ricognizione effettuata nel presente capitolo, si è cercato di analizzare le potenzialità performative delle tecniche di modellizzazione fisica del suono. Il criterio di scelta che ha accompagnato tale analisi ha privilegiato la documentazione della estrema varietà ed eterogeneità delle soluzioni sperimentate nel corso degli anni. Tale molteplicità costituisce un valore che testimonia della fecondità della tecniche di modellizzazione fisica e delle sue possibilità espansive in contesti anche molto differenziati, che è stato possibile apprezzare e valorizzare proprio mediante la ricostruzione di un panorama il più possibile complessivo.

Come constatato nel corso del capitolo, la costruzione dello strumento riflette, in modo non arbitrario, la concettualità strumentale alla base della formalizzazione del modello: se le implementazioni del STK sembrano costituire l'accesso più utilizzato alle tecniche di modellizzazione, si osserva quanto, nella maggior parte dei casi, che – almeno nel contesto degli strumenti qui discussi – queste ultime siano state esplorate non tanto con la finalità di creare nuove identità strumentali, quanto, piuttosto, con quella di manipolare identità note all'insegna dell'estensione parametrica del modello iniziale: l'algoritmo *corda di metallo* di Lupone ricerca una nuova materialità e una nuova articolazione tecnica del sistema corda-arco in dialogo con il linguaggio della tradizione; il modello elaborato da Jaffe provoca la paradossale espansione delle corde pizzicate di un mandolino nei cavi del *Golden Bridge*; le prime sperimentazioni del *celletto* di Chafe, controllano il modello con le gestualità proprie del violoncello; la sofisticata interfaccia *BoSSA* di Trueman ricrea la presenza della sorgente del suono attraverso un'inusuale configurazione di input e di output del modello delle campane a vento, all'interno di una nuova esperienza performativa del modello fisico, riscrivendone la relazione esecutore-fruitori; fino ad arrivare alla maraca virtuale di Reyes capace di assumere, durante l'esecuzione, le differenti forme strumentali e materiali della famiglia dello strumento, con risultati espressivi molto articolati provenienti dalla modellizzazione delle caratteristiche timbriche dei suoni colte attraverso l'analisi della gestualità dell'esecutore.

L'estensione degli strumenti virtuali si è articolata anche nella dimensione spaziale, come, ad esempio, nel caso della campana tibetana usata da Burtner, la quale

si estende fino a saturare, inglobando il pubblico, lo spazio della *Rotunda Dome*, che risuona delle peculiarità spettrali della campana.

Sebbene sia evidente che – essendo la modellizzazione di tali strumenti, per sua natura, incentrata sul controllo dei meccanismi di produzione del suono – la manipolazione parametrica riguardi indissolubilmente strumento e gesto, cosicché anche quest’ultimo può costituirsi, nell’atto esecutivo, sia come riproduzione, sia come espansione, sia come ibridazione e astrazione della gestualità reale. In particolare, l’espansione dei parametri del meccanismo di produzione del suono del modello di quattro flauti di bambù cinesi di 9.000 anni fa, è il fulcro su cui si costruisce l’installazione di *Oxygen flute*, la quale crea uno spazio artificiale interattivo che si espande e si ritrae, al variare della respirazione umana che eccita il modello stesso. Il *focus* sui meccanismi di produzione del suono è stata la spinta, inoltre, per l’esplorazione di oggetti della quotidianità, che hanno creato l’opportunità di indagare, nel dettaglio, le potenzialità della modellizzazione del gesto, non nel senso di gestualità strumentale tradizionale, bensì nell’accezione antropologica di azione, quell’azione che costituisce, come si vedrà nel terzo capitolo, il fulcro della *cyber action composition* di Kojis (§ 3.5.2).

La sperimentazione artistica dell’estensione quantitativa dei parametri di modellizzazione di oggetti e dei meccanismi di produzione si è spinta, in altre esperienze, oltre i confini dell’identità strumentale del reale, fino a indagare identità nuove e gestualità non più coerenti con la tipica relazione eccitatore-risonatore. In tal senso, un primo affrancarsi dal consueto è rappresentato dal *metasax* di Burtner, che conserva la gestualità ordinaria dello strumento per farne un inedito controller di un sistema arco-corda: una vera e propria ibridazione di tecniche e di gesti strumentali, che ibridano, in un unico sistema, strumento acustico e modello fisico. L’esito più distanziante è costituito dalla ibridazione di strumenti e di gestualità, tutta nel virtuale, sperimentata da Kojis, il quale, in *E-clip-sing*, per uscire dalla artificialità della tradizione, prende a modello la complessità della natura. Nel brano, come si è visto nei diversi strumenti creati dall’autore – *Buiara*, *Psychopsis* e *Odontocidium* – la virtualità permette esplorazioni gestuali che si allontanano dai consueti meccanismi di produzione del suono, creando una mescolanza di componenti e di azioni del tutto al di fuori dell’esperienza.

All'interno, invece, di un ambito performativo del tutto astratto, si sono configurati strumenti generati a partire da unità fisiche elementari, che, pur radicandosi nella meccanica del mondo fisico, si realizzano nel virtuale mediante una strutturazione degli elementi del tutto fluida: ne è un esempio l' 'orchestra' di *pico..TERA* i cui strumenti sono generati da differenti articolazioni temporali: da semplici micro-eventi (*Wind, maracas e triangle*) a complessi macro-eventi temporali (*beater, lo snake e il domino*), fino ad un ulteriore livello di complessità, ad un diverso piano gerarchico, costituito dal 'leader', che coordina le gestualità all'interno di 'orchestra': strumenti, dunque, stranianti, che si nutrono metaforicamente del reale, come si testimonierà nel terzo capitolo (§ 3.4).

Gli strumenti astratti sono stati bene indagati in *Hélios* e, ancor di più, in *Quetzalcóatl* che testimoniano l'interesse, sempre più strategico, delle potenzialità multimodali, fino ad arrivare alla integrazione di interfacce con doppio sistema aptico, per la gestione di strumenti fisici virtuali 3D immersivi – quali, tra quelli analizzati, *Gongs-Brothers, Lunar Big-bang, o Cosmic-snakes* – dettati dall'urgenza di ricostruire la sensorialità tipica dell'esperienza strumentale, un aspetto della ricerca che ha contraddistinto, come visto anche nel corso del primo capitolo I (§ 1.3.2), l'elaborazione del formalismo Cordis-Anima espressamente fondato sull'interattività e sulla multisensorialità.

La concettualità sottesa a questa proliferante molteplicità di ricadute performative si costituisce nella natura stessa della modellizzazione fisica che si radica nel modello della sorgente, il quale determina uno spazio dell'invenzione potenzialmente infinito, in cui il musicista costruisce il proprio strumento, che diviene un elemento essenziale dell'atto creativo. Il confine tra reale e virtuale pare, così, essere il cuore di tale sintesi il quale, radicato nella fisicità, si proietta nel virtuale, producendo assetti performativi che riscrivono in modo sempre differente la relazione tra virtualità e realtà. Così, strumenti e gesti si costituiscono nel riferimento ineludibile alla fondante relazione tra realtà e virtualità, testimoniando somiglianze, variazioni o straniamenti: elementi del reale che si distorcono, quantitativamente o qualitativamente, nel virtuale, pur rimanendo all'interno di modalità performative congruenti col mondo fisico, oppure elementi del tutto concepiti nel virtuale che ritornano al reale attraverso un processo di metaforizzazione (§ 3.4).

Con lo sviluppo di ambienti compositivi sempre più interattivi, che ha caratterizzato la ricerca in questi ultimi anni, si è assistito all'ulteriore ampliamento del contesto performativo degli strumenti virtuali: la simulazione multisensoriale in tempo reale, la sincronizzazione della architettura software/hardware in tempo reale,¹³⁹ la creazione di nuovi oggetti sonori su nuove funzionalità CAD sono campi interrelati che costituiscono le nuove frontiere della ricerca artistica nelle sue declinazioni transdisciplinari e immersive, mediante i quali gli strumenti virtuali sono sottoposti ad una continua ridefinizione.

In particolare, il controllo degli strumenti musicali virtuali, come si è visto negli esempi sopra riportati, è un vivace campo di ricerca che sviluppa le potenzialità della modellizzazione fisica nell'ambito della creazione di artefatti sensoriali virtuali ed espressivi.

Analogamente a quanto avvenuto nel corso del Novecento, in cui gli approcci basati sul segnale si sono sviluppati in parallelo con le ricerche in psicofisica, nel XXI secolo la modellizzazione fisica è divenuta, come profetizzato da Risset e ripreso anche da Castagné,¹⁴⁰ uno dei possibili strumenti per avvicinarsi alla percezione come sistema globale, sviluppando nuove branche nelle scienze cognitive che hanno consentito, ad esempio, di identificare i processi coinvolti nella costruzione delle rappresentazioni mentali degli oggetti, oppure di individuare le condizioni necessarie e sufficienti per innescare il 'senso di presenza' negli oggetti virtuali.

Grazie all'utilizzo di modelli fisici unitari, o multisensoriali accoppiati a dispositivi di force-feedback, che consentono, al loro interno, processi di manipolazione, assimilazione e incarnazione paragonabili a quelli degli strumenti acustici, l'emergenza di nuove tematiche, quali, ad esempio, la nozione di dinamica strumentale multisensoriale, tende, oggi, a ridefinire la natura dell'interazione tra esecutore e strumento:

¹³⁹ Cfr., ad esempio, MAX NEUPERT – CLEMENS WEGENER, *Isochronous Control + Audio Streams for Acoustic Interfaces*, in *Proceedings of the Linux Audio Conference (LAC-19)*, CCRMA, Stanford University, 2019, pp. 89-93.

¹⁴⁰ Cfr. JEAN-CLAUDE, RISSET *Modèles physiques et perception – modèles physiques et composition*, in *Actes du colloque «Modèle physique, création musicale et ordinateur» organisé par l'ACROE à Grenoble en 1990*, Édition Maison des Sciences de l'Homme, Paris 1994, vol. III, p. 709-720; NICOLAS CASTAGNÉ – CLAUDE CADOZ, *10 Criteria for Evaluating Physical Modelling Schemes for Music Creation*, Digital Audio Effects Conference DAF-X, London 2003, [7 pp.], par. 2.5.

Finally, in a time where the tech industry is rapidly shifting the focus of haptics as we know it towards vibrotactile touch-screen interfaces and *mid-air haptics* for mixed realities, the musical and more generally the artistic question still calls for qualitative, tangible interaction with virtual objects, mediated through true force-feedback technologies. Without moving too far out of our comfort zone, we could posit that the “magic” that we, as humans, experience when interacting with an instrument (be it musical or otherwise) is in no small amount linked to the discovery and progressive mental and physical incorporation of the new dynamical system composed of ourselves and the instrument. If technology allows this kind of magic to occur when interacting with a virtual instrument, or when interacting with each other through a virtual instrument —then this path is unquestionably one worth exploring, both for artistic purposes and for the development of human computer interaction.¹⁴¹

Tali molteplici esperienze rappresentano nuove sperimentazioni di forme d’arte multisensoriali incentrate sulla dinamica fisica tra attori multipli e legami fisici simulati. La tendenza nelle opere recenti ad esporre esperienze fisiche condivise, attraverso l’interazione forza-feedback (§ 2.2.2.3) – quali ad esempio l’interstrumentalità sperimentata da Cadoz in *Quetzalcóatl* – è particolarmente feconda per sviluppare la ricerca che collega l’esperienza tattile all’emozione umana e alla comunicazione interpersonale.¹⁴² L’aptica costituisce, in tale contesto, uno strumento unico per esplorare quest’area, analizzando i processi cognitivi incarnati, quantificando l’impatto dello scambio energetico tra il corpo e gli strumenti, e, più in generale, producendo sfide scientifiche e artistiche intrecciate.¹⁴³

L’impiego di tali pratiche, anche nella progettazione di strumenti musicali, può rappresentare l’emergere di una nuova branca di strumenti musicali digitali fondata sull’intenzionalità e l’impedenza motoria più che sul controllo in senso stretto, che ne sviluppino, così, le potenzialità fisico-dinamiche.¹⁴⁴ In tal modo, non solo ci affidiamo al

¹⁴¹ JAMES LEONARD – JEROME VILLENEUVE – ALEXANDROS KONTOGEORGAKOPOULOS, *Multisensory Instrumental Dynamics as an Emergent Paradigm for Digital Musical Creation*, «Journal on Multimodal User Interfaces», XIV (2020), pp. 235-253.

¹⁴² Cfr. in part. LEONARD – CASTAGNÉ – CADOZ – ANNIE LUCIANI, *The MSCI Platform: a Framework for the Design and Simulation of Multisensory Virtual Musical Instruments*, in *Musical Haptics*, a cura di Stefano Papetti e Saitis Caharalampos, Springer, Berlin 2018, pp. 151-169.

¹⁴³ Cfr. *Musical Haptics cit.*

¹⁴⁴ Edgar Berdahl, ad esempio, presso il CCRMA, ha sviluppato HSP (*Haptic Simple Platform*), una piattaforma economica e facile da programmare per l’implementazione di strumenti musicali aptici. Cfr. DAN OVERHOLT – EDGAR BERDAHL – ROBERT HAMILTON, *Advancements in Actuated Musical Instruments*, «Organised Sound», XVI (2011), pp. 154-165. Sul versante degli studi sulla percezione vibrotattile

feedback uditivo per navigare tra i suoni, ma siamo anche guidati da continui interscambi tangibili con lo strumentario,¹⁴⁵ che permettono la realizzazione dell'idea di un audio digitale effettivamente modellizzato e articolato attraverso interazioni tattili tridimensionali (3D).

Durante il suo discorso di apertura della Conferenza Internazionale di Computer Music 2011, all'Università di Huddersfield, Simon Emmerson ha suggerito, infatti, che l'idea di scolpire il suono è ora «a metaphor that could be made 'real' through suitable haptic interfaces and three dimensional representation»,¹⁴⁶ che rende possibile l'esperienza di oggetti, superfici e *texture* palpabili, sebbene virtuali. Nascono così nuove possibilità di progettare interazioni basate su una miriade di gesti, in cui ci si può imbattere in superfici virtuali, e muoversi attraverso atmosfere diverse e a diverse velocità.¹⁴⁷

La prospettiva è quella di creare un ambiente intelligente per la gestione delle problematiche software e hardware legate al tracciamento, alla mappatura parametrica e all'interfacciamento con gli strumenti virtuali.¹⁴⁸ Grandi sforzi, in tal senso, sono stati fatti nella ricerca e nell'implementazione di interfacce sempre più complesse in risposta, da un lato, a una richiesta di sempre maggiore espressività e continuità, e, dall'altro, alla possibilità di utilizzare più parametri come flusso continuo di dati di controllo, a diversi gradi di modulabilità: «many of the striking lessons from our history of intimate

nell'ambito delle interfacce musicali applicate agli strumenti tradizionali, si veda, ad esempio, FEDERICO FONTANA – FEDERICO AVANZINI – STEFANO PAPETTI – HANNA JÄRVELAINEN – GIORGIO KLAUER – LORENZO MALAVOLTA, *Un prototipo di pianoforte digitale con feedback vibrotattile*, in *Proceedings of Colloquium on Musical Informatics* (XXI CIM), Cagliari 2016, pp. 151-157.

¹⁴⁵ Per un esempio di un'interfaccia tattile usata come strumento per l'esecuzione di musica digitale cfr. LAUREN HAYES, *Performing Articulation and Expression Through a Haptic Interface*, in *Proceedings of the International Computer Music Conference (ICMC)*, Ljubljana 2012, pp. 400-403.

¹⁴⁶ SIMON EMMERSON, *Music Imagination Technology, Keynote Address*, in *Proceedings of the 2011 International Computer Music Conference*. Huddersfield 2011, pp. 7-24: 19.

¹⁴⁷ Cfr. HAYES, *Performing Articulation and Expression Through a Haptic Interface* cit.; TYCHONAS MICHAILIDIS – JASON HOCKMAN, *Affordances of Vibrational Excitation for Music Composition and Performance*, in *Proceedings of the 15th Sound and Music Computing Conference (SMC2018) – Sonic Crossings*, Limassol 2018, pp. 382-387.

¹⁴⁸ «Theory and praxis of musical interface design would benefit from a holistic approach, combining knowledge and methods from different disciplines, among which HCI, Music Cognition, and Philosophy» FABIO MORREALE, *A Holistic Approach to the Design of Digital Musical Instruments*, in *Proceedings of the 22nd CIM*, Udine 2018, pp. 37-38. Sulle innumerevoli ricerche riguardanti le interface cfr. in part. i *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression (NIME)*, London 2014.

expressive musical instruments lie in the blurred boundaries between player, controller, and sound producing object».¹⁴⁹

Più recentemente, sono state individuate diverse soluzioni per costruire interfacce ibride per il controllo dei modelli fisici con strumenti musicali. L'idea principale è che l'eccitazione del mondo reale (ad esempio il suono di un pizzico su una chitarra, il suono creato da un bocchino su un clarinetto, etc.) possa essere accoppiata a risonatori virtuali. Poiché per molti strumenti musicali, l'eccitazione è uno delle componenti più difficili da modellizzare, a causa di un numero particolarmente elevato di parametri da controllare, con tale approccio, viene ad essere calcolata solo la parte risonante dello strumento, rendendo, così, il modello fisico molto più semplice.

Un'interfaccia ibrida – ma alcuni ricercatori pensano in termini di una interfaccia acustica – permette, ad esempio, di eccitare direttamente i risonatori digitali (guide d'onda digitali, *lumped models*, sintesi modale, *sample convolution*, ma anche linee di ritardo del feedback e filtri).¹⁵⁰ L'alimentazione di un segnale analogico di eccitazione in un risonatore digitale può creare sia i suoni familiari degli strumenti acustici, sia suoni sintetici del tutto inediti prodotti, però, attraverso un tocco analogico: «In a post-digital environment where “the paradigms analogue and the digital [...] exist simultaneously” we believe that many new instruments will be seen in this new category of acoustic excitation instruments with digital resonators».¹⁵¹

In ambito più strettamente compositivo, nuovi strumenti ibridi – combinando elementi fisico-acustici e virtuali/digitali fisicamente informati – risultano fisicamente coerenti per natura e permettono ai progettisti di strumenti di giocare con i punti di forza degli elementi acustici e digitali. Le tecnologie attuali ci permettono, infatti, di sfumare

¹⁴⁹ COOK, *Remutualizing the Musical Instrument: Co-Design of Synthesis Algorithms and Controllers* cit., p. 4.

¹⁵⁰ Due esempi recenti: *Tickle* che prevede l'alimentazione di un segnale analogico di eccitazione in un risonatore (digitale) e che combinando diverse tecniche e tecnologie (Touch pad, microfono a contatto e sintesi per modellizzazione fisica) rappresenta un potente strumento intuitivo che consente un'interazione naturale e 'profonda' con un preciso controllo del suono (cfr. NEUPERT – WEGENER, *Isochronous control + audio streams for acoustic interfaces* cit.); *Bladeaxe*, un controller simile a una chitarra che utilizza le eccitazioni audio 'real world' di sei pellicole piezoelettriche (una per corda) per pilotare un modello fisico di chitarra su un laptop. Come interfaccia 'plug and play', può essere usata su qualsiasi computer per comunicare con il software open-source per chitarra virtuale. Cfr. ROMAIN MICHON – JULIUS O. SMITH III, *A Hybrid Guitar Physical Model Controller: The BladeAxe*, in *Proceedings ICMC/SMC/2014*, Atene 2014, pp. 573-579.

¹⁵¹ NEUPERT – WEGENER, *Interacting with Digital Resonators by Acoustic Excitation*, in *Proceedings of the 16th Sound and Music Computing Conference (SMC 2019)*, Malaga 2019, 2 pp., p. [2].

il confine tra il mondo fisico e quello virtuale, consentendo ai progettisti di strumenti musicali di trattare le parti dello strumento in modo multidimensionale. Il FAUST Physical Modeling Toolkit (§ 1.3.6), ad esempio, facilita la progettazione di tali strumenti, fornendo un modo per accostarsi alla modellizzazione fisica ad un livello molto alto: i dispositivi mobili, combinati con estensioni fisiche passive o attive, in tale contesto, possono diventare il cuore dell'implementazione di nuovi strumenti ibridi. Smartphone e tablet, infatti, possono essere aumentati con elementi passivi e attivi che prendono parte alla produzione del suono (ad esempio, risonatori, eccitatori, ecc.), aggiungendo nuove funzionalità al dispositivo, o cambiandone l'estetica globale e/o la forma (§ 1.3.6).¹⁵²

Tali nuovi strumenti possono interrelarsi con nuovi software che hanno permesso, negli ultimi anni, lo sviluppo di una nuova tipologia di liuteria virtuale, ottenuta modellizzando degli inediti risonatori a partire da un disegno su CAD 3D. I vantaggi di tale approccio consistono nella produzione di suoni iperrealistici di alta precisione, nella possibilità di progettazione del suono a partire da modelli 3D, e nelle simulazioni fisiche di strumenti impossibili fatti di materiali rari ed esotici come, ad esempio, lo zaffiro, il berillo, l'uranio, il plutonio, etc:

Realism, however, here has only a functional role, rather than aesthetical. The aim of this research is to create surrealistic instruments, impossible, or immensely hard to build and mise en oeuvre such as platinum, diamond, beryl, sapphire and plutonium resonators. Physical modelling of course is not new, but new software tools bloomed during these years, thanks to research done in aerospace and building industries. These softwares create an essential bridge to set the fundamentals for a new form of numerical lutherie.¹⁵³

Grazie alla nuove possibilità connesse con il tracciamento, la mappatura parametrica, l'interfacciamento e la modellizzazione fisica degli oggetti, sono state ampliate notevolmente le possibilità compositive, fino ad arrivare alla categoria costituita dagli *strumenti musicali di realtà virtuale* (VRMI), che includono una componente visiva

¹⁵² Cfr. ROMAIN MICHON – SMITH III – MATTHEW WRIGHT – CHRIS CHAFE – JOHN GRANZOW – GE WANG, *Mobile Music, Sensors, Physical Modeling, and Digital Fabrication: Articulating the Augmented Mobile Instrument*, «Applied Sciences», VII (2017), [31 pp.].

¹⁵³ GIORGIO SANCRISTOFORO, *Triple Axis Modal Synthesis*, <<http://www.giorgiosancristoforo.net/2016/06/29/triple-axis-modal-synthesis/>> (accesso 15-01-2018).

simulata, fornita tramite un display montato sulla testa o da altre forme di visualizzazione immersiva.¹⁵⁴ Tali tecnologie di realtà virtuale offrono nuove possibilità di esplorazione dell'interazione musicale, che consentono di studiare le interazioni fisiche continue e i feedback multimodali con lo strumento, al fine di espandere le possibilità creative delle installazioni musicali VR e degli oggetti musicali attualmente disponibili.

¹⁵⁴ SERAFIN – CUMHUR ERKUT – KOJS – NIELS CHR. NILSSON – ROLF NORDAHL, *Virtual Reality Musical Instruments: State of the Art, Design Principles, and Future Directions*, «Computer Music Journal», XXXX (2016), pp. 22-40.

Capitolo III

Comporre con gli strumenti virtuali: dalla virtualizzazione di gesto e strumento al physical thinking

3.1 Introduzione

I dream of instruments obedient to my thought and which with their contribution of a whole new world of unsuspected sounds, will lend themselves to the exigencies of my inner rhythm.¹

Edgard Varèse

Nel corso del secolo scorso, è emersa una nuova idea di tecnologia, legata non più al 'mondo della strumentalità' ma al proprio 'ambiente di esistenza':² nel campo delle pratiche musicali, appare come particolarmente cruciale il passaggio, a partire dalla seconda metà del Novecento, dall'uso della liuteria elettronica – per molti tratti legata al rituale concertistico ottocentesco e a stilemi musicali raramente in sintonia con gli sviluppi compositivi dei loro tempi – alla costruzione di ambienti di lavoro, costituiti da attrezzature interconnesse e riconfigurabili a seconda di specifici compiti, che si accompagna a una maggiore considerazione del valore musicale delle scelte e delle responsabilità tecnologiche. Inizia, o meglio riprende, una più vitale dialettica tra tecnologia ed istanze estetiche dei processi creativi. La pregnanza di un fatto musicale, proprio in quanto tale, sta non solo nelle sue qualità strutturali ed espressive, prodotto finale del fare, ma anche nei modi e nelle tecniche del suo essere fatto, nei processi: il fine estetico, da solo, non giustifica più i mezzi.³

¹ EDGARD VARÈSE, CHOU WEN-CHUNG, *The Liberation of Sound*, «Perspectives of New Music», V (1966), pp. 11-19: 11.

² «Se da un lato, la categoria del "materiale sonoro", prima riferita a qualcosa di pre-esistente e perfino di "naturale", veniva ora ad indicare qualcosa di altrimenti inesistente, di deliberatamente forgiato in base ad un'idea musicale particolare: l'opera musicale tende a diventare "artificio integrale"». AGOSTINO DI SCIPIO, *Tecnologia dell'esperienza musicale nel Novecento*, «Rivista italiana di musicologia», XXXV (2000), pp. 211-245: 221.

³ «Data la forte astrazione logica e simbolica propria di questa tecnologia, si ha qui come la tendenza a spostare il giudizio estetico dalla forma sensibile dell'opera come prodotto finito alla forma dei processi

Dagli anni Sessanta, nell'ambito della musica generata al computer, dopo una prima stagione dominata dalla logica rigorosa delle macchine compositive – ovvero da quei vari formalismi musicali su base logico-matematica, proposti più volte nel corso del secolo – grazie anche allo sviluppo di programmi più indipendenti dal sostrato hardware e, soprattutto, alla possibilità di un maggiore accesso ai codici di programmazione, si assiste a una maggiore autonomia di azione nell'esperienza delle pratiche musicali. Ricompare allora la figura di un rapporto dialettico e contraddittorio interno al processo tecnologico-musicale, teatro di un confronto tutt'altro che ovvio e lineare, che sancisce la conflittualità tra orizzonte dei mezzi e orizzonte dei fini, che emerge ogni volta che la forza del pensiero musicale richieda un serio lavoro tecnologico e di ricerca dei fini e dei mezzi:⁴ ogni opera si offre come traccia sensibile di un insieme di scelte ed opzioni che stabilisce un particolare rapporto tra il fare dell'arte e le condizioni tecniche di esistenza ad esso relative, e rimanda a determinate forme di lavoro, a vari saperi tecnici e a varie modalità di comprensione del fare arte.

Riprendendo lo schema semiotico tripartito di Jean Molino⁵ – neutro/immanente, poietico e estesico – che Jean-Jacques Nattiez estende anche alla musica acusmatica, dovremmo collocare nell'atto compositivo tutte le procedure che lo hanno generato, e dunque anche le altre componenti materiali come strumenti, notazione, spazio⁶. Così a fronte di un'arte, non più chiusa nella sola dimensione estetica ma compresa anche nel dominio della conoscenza tecnologica, testimoniato da un processo di razionalizzazione delle pratiche e dei materiali, si potrebbe individuare, per quanto riguarda la tecnologia informatica, un percorso di avanzamento sempre più pervasivo nel campo poietico dell'arte, e quindi nei domini di interazione culturale e cognitiva: un agire artistico

di produzione. [...] Ogni strumento, in senso lato, è sede di conoscenze, speranze e sistemi di valori particolari, e reca l'impronta di coloro che lo hanno ideato e/o costruito, e contribuisce come tale a confermare e diffondere idee e valori caratteristici di quell'impronta, dunque relativi e storicamente definiti». DI SCIPIO, *Tecnologia dell'esperienza musicale nel Novecento* cit., pp. 234-239. Per una disamina della relazione tra dimensione estetica e pratiche tecnologiche nella musica del Novecento cfr. in part. GIANMARIO BORIO, *L'esperienza estetica sotto l'egida della tecnologia*, in *La musica fra testo, performance e media. Forme e concetti dell'esperienza musicale*, a cura di Alessandro Cecchi, Neoclassica, Latina 2019, pp. 31-54.

⁴ Cfr. al proposito: DI SCIPIO, *Tecnologia dell'esperienza musicale nel Novecento* cit., pp. 229-230.

⁵ JEAN MOLINO, *Fait musical et sémiologie de la musique*, «Musique en jeu», XVII (1975), pp. 37-62.

⁶ Per l'applicazione dello schema semiotico alla musica acusmatica cfr. in part. JEAN-JACQUES NATTIEZ, *Musicologia generale e semiologia*, a cura di Rossana Dalmonte, Torino, EDT, 1989, *Lo statuto semiologico dell'oggetto sonoro*, pp. 71-79.

sempre più proteso a comporre il suono e un agire tecnologico sempre più proteso a comporre con i suoni.⁷

All'interno di una tale complessa relazione, attraversata da percorsi necessariamente interdipendenti delle due dimensioni, potremmo collocare i due paradigmi della rappresentazione del suono nel dominio digitale che sono stati illustrati nel primo capitolo: i modelli del segnale, che cercano di riprodurre il suono senza far riferimento al meccanismo fisico che lo genera (riproduzione dell'effetto), e i modelli della sorgente, che generano il segnale acustico simulandone il meccanismo fisico di produzione: per questi ultimi non è rilevante l'analisi del segnale che percepiamo, bensì l'analisi del modo in cui il suono si produce (riproduzione del processo).

Ponendo a confronto i due paradigmi, si potrebbe individuare, sul lungo periodo, una graduale virtualizzazione degli elementi fondamentali delle pratiche esecutivo-compositive: dai primi esempi di sintesi del segnale, alla sintesi delle sorgenti del suono (strumenti e gesti) fino alle più attuali pratiche di composizione derivanti dall'intelligenza artificiale (per esempio, il *machine learning* applicato ai processi compositivi). Se i processi compositivi della prima stagione della computer music, infatti, erano tutti compresi nel mondo della strumentalità, in quanto mezzi al servizio di un'idea compositiva precostituita, si è strutturato, nel prosieguo, un percorso di osmosi tra la dimensione ideativa e quella della strumentalità, che ha sancito l'entrata del virtuale nella creatività artistica.

La sintesi per modelli fisici si pone, in tal senso, come un passaggio fondamentale, consentendo, tra l'altro, il capovolgimento prospettico dell'agire compositivo: non più rivolto al suono, ma all'azione meccanica che lo produce, in quanto strumento e gesto. Lo spazio compositivo offerto dalla modellizzazione si configura, così, attraverso un processo di dissolvenza incrociata tra il processo di virtualizzazione delle prassi musicali e la 'disgregazione' dello strumento attuata dalle diverse tecniche di modellizzazione: partendo dalla modellizzazione dello strumento e del gesto, fino allo smembramento e alla ricomposizione in nuove identità dello strumento, per arrivare alla atomizzazione

⁷ Un rapporto con la tecnologia che feconda l'agire compositivo nella sua totalità come ribadito recentemente da Risset: JEAN-CLAUDE RISSET, *Remarques de Jean-Claude Risset*, «Musica/Tecnologia», IV (2010), pp. 33-38.

della materia, al fine di una re-invenzione dell'intero ciclo creativo, come si è visto in Genesis, che si pone come mezzo unico per la creazione di musica.

Nel corso del capitolo si illuminerà proprio tale dialettica strumento/gesto virtuale-processo compositivo, mettendo in luce quanto la strumentalità entri nella sfera dell'ideazione e dell'articolazione linguistica con prospettive ed esiti sempre diversi, producendo inediti spazi percettivi tra il fisico, il plausibile e la totale astrattezza. A tal fine, si proporranno, inoltre, tre casi di studio – *Corda di metallo* di Michelangelo Lupone, uno dei primi esempi dell'uso artistico della modellizzazione di una corda derivante dal metodo di Hiller-Ruiz, la *cyber action composition* di Juraj Kojs, e, infine, le opere di Mauro Lanza che utilizzano i modelli fisici – che testimoniano tre angolazioni prospettiche del tutto differenti riguardo l'uso delle tecniche di modellazione fisica.

3.2 *Comporre nel dominio del plausibile*

Gli strumenti costruiti mediante le tecniche di modellizzazione, descritti nel capitolo II, ci hanno mostrato un'ampia e assai variegata gamma di liuteria digitale, che, a partire dalla piena imitazione dello strumento fisico, arriva a costruire modelli del tutto trascendenti la dimensione del reale: strumenti virtuali che simulano meccanismi del mondo fisico, attraverso strutture catturate dal mondo fisico medesimo, strumenti del tutto decostruiti nelle loro componenti e ricostruiti in moduli assemblati arbitrariamente, fino a giungere a concepire meccanismi di produzione del suono del tutto inediti e trascendenti la realtà, fondati sull'atomizzazione della materia, in cui viene persa la dimensione culturale di oggetto/strumento, in funzione di un ritorno a una dimensione fisica, elementare. Queste diverse dimensioni della rappresentazione degli oggetti produttori di suono testimoniano, nel loro insieme, una progressiva decostruzione dello strumento acustico, fino alla più sottile parcellizzazione della materia in atomi che, proprio mediante tale frantumazione produce una progressiva costruzione dell'astratto per la creazione di realtà altre: come affermato, infatti, da Borin *et al.*, i modelli fisici sono 'generatori di realtà'.⁸

Se l'imitazione dei meccanismi di produzione del suono della realtà pareva essere la premessa ideale per la creazione di suoni complessi – mettendo così l'accento sulle loro caratteristiche timbriche e microstrutturali distintive, al fine di trascendere la relazione puramente astratta e interna tra suoni ed eventi, tipica della prima stagione della musica elettronica –, una nuova dimensione dell'astratto si fa strada con la modellizzazione fisica: un astratto 'fisicamente informato' del tutto avulso dal dominio del reale seppur derivante dalla materia e da azioni meccaniche. Come visto nel secondo capitolo, relativamente al lavoro di Cadoz e della sua équipe, tale materiale, che è astratto dal mondo reale ma, nel contempo, fondato sulle leggi della fisica, ha tutto il potenziale per invocare associazioni e immagini, attingendo ad un'intera area di esperienze meta-realistiche soggettive: è proprio, infatti, perché non si è in grado di fare un'associazione diretta con il mondo reale e l'esperienza comune che si può rimanere affascinati dai fenomeni astratti.

⁸ Cfr. GIANPAOLO BORIN – GIOVANNI DE POLI – AUGUSTO SARTI, *Algorithms and Structures for Synthesis Using Physical Models*, «Computer Music Journal», XVI (1992), pp. 30-42.

L'interazione tra astrazione e realismo rappresenta un fondamento inscindibile della letteratura della modellizzazione fisica analizzata, costituendo gli estremi di riferimento di uno spazio virtuale, all'interno del quale si articola l'agire compositivo dell'artista (§ 2.4). Tuttavia, il realismo cui si fa riferimento, attraverso la simulazione della modellizzazione, è, per sua natura, già altro dal reale – il modello, infatti, simula ciò che è reale selezionandone alcuni tratti per poter costruire un meccanismo d'azione funzionale alla costruzione di un suono organico e complesso, e da tale artificio avvia un'estensione nel virtuale –, così come, paradossalmente, l'astratto viene costruito, all'opposto, attraverso la modellizzazione di elementi fisici, non di parametri direttamente acustici, bensì materiali, come si è visto nelle ricerche del team ACROE. Per quanto il riferimento al reale possa essere lontano, il suono, sebbene possa risultare straniente ed astratto rispetto alla realtà fisica culturalmente riconoscibile, costituisce, comunque, il risultato di un meccanismo generativo radicato nel mondo fisico e nella materia, generando uno spazio all'interno del quale l'orecchio possa orientarsi: il fisicamente plausibile.

Il complesso legame tra realismo e astrazione, quindi, passa attraverso la questione della riconoscibilità di una sorgente sonora nel processo percettivo, una problematica affrontata, fin dagli esordi della computer music, negli scritti di Risset, il quale sottolineava come i suoni sintetizzati avessero un profilo migliore e risultassero più facilmente accettati dagli ascoltatori, quanto più il soggetto era portato a ritenere che fossero stati prodotti secondo una qualche modalità fisica,⁹ implicando in, tal modo, che il percepire un certo livello di fisicità, contribuisse, in modo decisivo, al livello di 'credibilità' attribuibile al suono sintetizzato (§ 1.2.1). Se è vero, dunque, che ogni tecnica di sintesi può produrre suoni tanto accurati da poter ricostruire l'ipotetico appiglio ad un supposto meccanismo fisico di produzione – come testimoniato, sempre, dall'opera e dalle ricerche di Risset, seppure riferite ad altri paradigmi di sintesi – tuttavia, per le ragioni sopra esposte, i modelli fisici producono naturalmente suoni credibili, anche se non progettati con riferimento a qualche oggetto reale: gli input in un modello fisico, infatti, tendono a modificare in modo coerente i vari parametri percettivi, creando

⁹ RISSET, *Modèles physiques et perception – Modèles physiques et composition*, in *Modèles Physiques Creation Musicale et Ordinateur*, ACROE, ed. de la Maison des sciences de l'homme, Grenoble 1990, vol. III, pp. 709-720.

plausibili evoluzioni dinamiche dei suoni e rafforzando fortemente, in tal modo, l'illusione di una causa permanente.

In tal senso, Bilbao, chiedendosi perché i compositori si preoccupino di simulare il comportamento di uno strumento esistente, individua, tra le diverse possibili risposte, la peculiarità di tali tecniche proprio nella loro capacità di consentire la costruzione di strumenti coerenti ed autonomi, manovrabili in tempo reale, per la realizzazione di esecuzioni musicali nel virtuale, senza i vincoli del mondo fisico:

Another answer, closer in spirit to the philosophy of this author, is that physical modeling sound synthesis is far more than just a means of aping sounds produced by acoustic instruments, and it is much more than merely a framework for playing mix and match with components of existing acoustic instruments (the bowed flute, the flutter-tongued piano, etc.). Acoustically produced sound is definitely a conceptual point of departure for many composers of electroacoustic music, given the early body of work on rendering the output of abstract sound synthesis algorithms less synthetic sounding, and, more importantly, the current preoccupation with real-time transformation of natural audio input. In this latter case, though, it might well be true (and one can never really guess these things) that a composer would jump at the chance to be freed from the confines of acoustically produced sound if indeed an alternative, possessing all the richness and interesting unpredictability of natural sound, yet somehow different, were available.¹⁰

La plausibilità fisica del suono (§ 1.2.1, 1.2.2) quindi non riguarda tanto l'individuazione di una fonte, come sottolineato da Castagné e Cadoz, quanto, piuttosto, il riconoscere quelle «subtle dynamic variations among perceptual parameters that lead the listener to think it was produced in some physical manner».¹¹ In tal senso, si può affermare che tali sottili variazioni dinamiche – tra i parametri percettivi che ingannano l'ascoltatore, inducendolo a pensare che il suono sia stato prodotto in modo fisico – creino effettivamente una causa fisica deliberatamente modellizzata dai compositori per chi ascolta. Tuttavia, tale fonte non deve necessariamente corrispondere a nessun equivalente del mondo reale, pur essendo in grado di possedere un certo carattere

¹⁰ STEFAN BILBAO, *Numerical Sound Synthesis: Finite Difference Schemes and Simulation in Musical Acoustics*, John Wiley & Sons, Hoboken NJ, 2009, p. 23.

¹¹ NICOLAS CASTAGNÉ - CLAUDE CADOZ, *10 Criteria for Evaluating Physical Modelling Schemes for Music Creation*, in *Proceedings of the 6th International Conference on Digital Audio Effects (DAFX-03)*, London, 2003, [7 pp.] p. [2]. In questo articolo è stato introdotto per la prima volta concetto di plausibilità di un suono.

fisicamente plausibile. A tal fine, Trevor Wishart ha formulato diversi archetipi (ad esempio, turbolenza, crack, frantumazione, ecc.) per identificare quei suoni la cui relazione fonte-causa potrebbe sembrare ambigua, ma che possiedono, comunque, una morfologia fisica complessa e plausibile.¹²

Il concetto di plausibilità è legato alle nozioni di incertezza/ambiguità, perché ciò che è plausibile è costitutivamente non certo. La questione dell'incertezza può svilupparsi secondo due direttrici che interagiscono strettamente nel concetto di plausibilità fisica: da un lato l'incertezza è di tipo aleatorio-stocastico, relativo cioè alla ambiguità della fonte, dall'altro, è di tipo epistemico, relativo cioè alla incertezza del soggetto percipiente. Così, nel dominio complesso del plausibile, fonte e soggetto percipiente sono costitutivamente interrelati, sebbene la dinamica di tale interrelazione si situi nell'orizzonte del non certo e dell'ambiguo.¹³

È partendo, probabilmente, da tali presupposti, che Smalley ha introdotto il concetto di *legame con la fonte* (*source bonding*) al fine di rappresentare il collegamento tra intrinseco ed estrinseco, cioè in altre parole, il legameificante che lega il mondo sonoro interno con il mondo sonoro esterno: «la *naturale* tendenza a mettere in relazione i suoni con fonti e cause ipotizzate, e a mettere in rapporto suoni che sembrano avere origini comuni o condivise»,¹⁴ poiché «la musica è una costruzione culturale, e nella cultura una ragione estrinseca è necessaria cosicché l'intrinseco possa avere significato. L'intrinseco e l'estrinseco sono interattivi». ¹⁵

I modelli fisici, dunque, partendo da identità conosciute, fanno riferimento a connessioni estrinseche in gradi crescenti di incertezza e distanza dalla realtà. Gli strumenti così manipolati nella loro identità costitutiva sono sottoposti ad aumenti di dimensioni, distorsioni della forma, incroci e ibridazioni, soppressioni o amplificazioni di particolari qualità timbriche: trattasi della generazione di una vera e propria liuteria sostitutiva dai tratti potenzialmente abnormi e aperta a soluzioni del tutto impossibili nella realtà fisica, nutrite da un immaginario multiforme e variegato cui le tecniche di

¹² Cfr. TREVOR WISHART, *On Sonic Art*, Harwood Academic Publishers, Amsterdam 1996.

¹³ Sul concetto di plausibilità cfr. in part. EMILIANO IPPOLITI, *Modelli d'inferenza plausibile*, Ph. D. thesis, Università La Sapienza di Roma, a.a. 2004-05.

¹⁴ DENIS SMALLEY, *La spettromorfologia: una spiegazione delle forme del suono (I)*, «Musica/Realtà», L (1996), pp. 121-137: 129.

¹⁵ SMALLEY, *La spettromorfologia: una spiegazione delle forme del suono*, cit., p. 128.

modellizzazione offrono la possibilità di tradursi in manufatto. L'utopia di generare dei costrutti 'contro natura' è finalmente resa possibile. Un'utopia, peraltro, perseguita anche nella letteratura acustica contemporanea in cui il sistematico utilizzo di tecniche estese negli strumenti tradizionali risponde all'esigenza di forzarne i limiti fisici, distanziandosi dalle sonorità note per ritrovare ignote sonorità archetipiche, che ridefiniscono la natura degli strumenti in rapporto all'identità del fisicamente plausibile.

Così, in *Corda di metallo* (§ 2.2.1.1), Lupone, attraverso la modellizzazione fisica, costruisce uno strumento virtuale – copia esatta di quello reale, gestualità idiomatica compresa – che, al tempo stesso, offre la possibilità di esorbitare dai limiti dello strumento acustico. La ricchezza sperimentale offerta dal modello fisico ha, in questo caso, permesso di acquisire conoscenze sul sistema archetto-corda che, in modo naturale, si sono riversate nel dominio del reale. Ne consegue, che le gestualità dello strumento acustico scaturiscono dallo strumento virtuale, il quale a sua volta si verifica e si perfeziona nel confronto/riscontro con lo strumento reale: ad esempio, il glissando timbrico ottenuto variando la pressione, la velocità e la posizione dell'arco; l'arco martellato, con funzione di iterazione omogenea del ritmo e conseguente cancellazione delle figure preminenti, che assume una valenza tecnica; l'arco con variazione di pressione e/o di velocità, tutte tecniche esecutive derivanti dalla gestualità dello strumento virtuale.

Altre esperienze più marcatamente proiettate sul versante della manipolazione identitaria sono testimoniate da ricerche in cui le sorgenti musicali assumono, ad esempio, proporzioni irreali, come i flauti in *Things She Carried* di Paul Lansky, o una gamma di differenti e irreali forme fisiche della batteria in *Can You Hear the Shape of a Drum?* di Andrew Schloss, oppure sostituiscono uno strumento con il corpo di un altro (di un sassofono soprano con il corpo virtuale di una campana in *S-Morphe-S* di Matthew Burtner), o ancora esplorano ibridi, come il metasax/corde in *S-Trance-S* del medesimo autore, oppure, ingrandiscono certi effetti spingendoli oltre le loro quantità abituali (l'overblowing del sax di Gary Scavone e il suono del respiro in *Pipe Dream*), o, ancora, infine, stravolgono del tutto le dinamiche del consueto, come la 'melodia', in *Hélios* di Cadoz, che emerge dall'incontro di un'onda stratosferica con gli oggetti che entrano nel suo raggio di azione, attaccandosi alla sua coda.

I pochi esempi qui evocati, fra i molti possibili affrontati nel secondo capitolo, partendo da identità esistenti, si situano all'interno di uno spazio fisicamente plausibile, lasciandone, comunque, intatto lo schema percettivo, come pure, all'interno di uno spazio fisicamente plausibile, si collocano gli strumenti astratti, i quali, però, ponendosi al di là e al di fuori dell'esistente, riscrivono, in profondità, le modalità della percezione intersoggettiva.

Nel diagramma 3.1 a pag. 238 si è visualizzata la lettura degli strumenti virtuali, con le loro implicazioni di tipo gestuale e di tipo percettivo, proposta e discussa, in dettaglio, in questo capitolo. In particolare, in relazione a quanto affermato nel presente paragrafo è stato evidenziato il concetto di plausibilità come spazio condiviso in cui gravitano tutte le diverse soluzioni incontrate, dall'appiglio al reale, all'astratto. Nel corso del capitolo, si ricorrerà più volte a tale schema che, nell'economia complessiva della trattazione, svolge la funzione di un vero e proprio diagramma generale.

3. 3 *Gestualità estese, ibride e astratte*

Se nella musica acustica, vocale o strumentale, ogni suono rimanda ad un'attività senso motoria – non vi è suono percepito se non prodotto da gesti umani che eccitano, secondo varie modalità, un corpo risonante – nella musica elettroacustica, in cui l'elemento gestuale umano produttore di suono è, almeno apparentemente, assente o, comunque, mediato, la creazione di un legame con la fonte sonora appare necessario, poiché la relazione percettiva, che rende il suono significante, consiste proprio nel ritornare alla gestualità fondativa che quel suono ha prodotto.

Secondo gli studi più recenti di psicologia della percezione musicale, il processo percettivo non appare più unicamente strutturato sulle caratteristiche formali dell'oggetto percepito, come affermato, ad esempio, dalla teoria della *Gestalt*, bensì anche da un'interazione corporeo-gestuale che facilita l'appropriazione di senso e, al contempo, favorisce meccanismi di disambiguazione. In particolare, sulla scia degli studi della psicologia della *Gestalt* degli anni '20-30, Gibson assunse l'idea che i sensi possano essere considerati dei sistemi percettivi diretti che colgono gli elementi invarianti dell'ambiente il quale, a sua volta, fornisce delle informazioni sulle modalità d'uso degli oggetti. L'approccio, basato sulla rilevazione, piuttosto che sulla sensazione delle informazioni nel mondo quotidiano, sottolinea quanto le informazioni relative ad un ambiente si rivelino all'osservatore attraverso un insieme di parametri quali energia, rapporti e proporzioni, parametri che aiutano a identificare le *affordance* o opportunità, costituite dalle funzioni e dai valori dell'oggetto offerti al soggetto in un rapporto di complementarità tra quest'ultimo e il suo ambiente.¹⁶

The concept of affordance is derived from these concepts of valence, invitation, and demand but with a crucial difference. The affordance of something does not change as the need of the observer changes. The observer may or may not perceive or attend to the affordance, according to his needs, but the affordance, being invariant, is always there to

¹⁶ «The affordances of the environment are what it offers the animal, what it provides or furnishes, either for good or ill. I mean [by affordances] something that refers to both the environment and the animal in a way that no existing term does. It implies the complementarity of the animal and the environment». Cfr. JAMES J. GIBSON, *The Ecological Approach to Visual Perception*, Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, NJ 1986, p. 119.

be perceived. An affordance is not bestowed upon an object by a need of an observer and his act of perceiving it. The object offers what it does because it is what it is.¹⁷

Tale prospettiva ecologica, che si concentra sulla percezione di ‘forme’ di azioni tra oggetti e fenomeni nell’ambiente, può essere felicemente applicata all’universo musicale basato su processi che mettono in relazione esecutori e strumenti sui quali si agisce secondo la capacità degli oggetti di suggerire determinate azioni, e conseguentemente la possibilità che l’ascoltatore si relazioni con l’oggetto proprio a partire dal riconoscimento della natura delle azioni coinvolte nel processo produttore di suono.

Una prospettiva, questa, che ha assunto particolare rilevanza, nell’ultimo trentennio, con il paradigma della *Embodied Music Cognition* (EMC) rivelatosi centrale nello studio della percezione musicale. L’idea è che i processi cognitivi siano soggetti ai vincoli propri del mondo fisico, i quali non si esauriscono, però, nei vincoli del sistema senso-motorio. Sviluppando tanto l’approccio cognitivo, quanto la tradizione fenomenologica, l’EMC ha messo in evidenza la fisicità corporea come mediatore imprescindibile di ogni atto cognitivo, concepito come un continuum percettivo che agisce in un determinato ambiente.¹⁸

L’atto percettivo, così concepito, rimanda, più o meno ellitticamente, ad un’azione reale, presunta o simulata, che costituisce un riferimento essenziale per una discriminazione uditiva che, però, risulta essere culturalmente orientata. Il coinvolgimento della dimensione corporea nell’atto percettivo si unisce così all’individuazione di strutture più o meno condivise e mediate culturalmente in un processo di appercezione complessiva.

Dal punto di vista delle problematiche della presente ricerca, converrà sottolineare quanto il richiamo mediato e indiretto alla corporeità diventi particolarmente significativo laddove l’input percettivo risulti per sua natura ambiguo, come quello prodotto dal mondo elettroacustico, poiché sono proprio il riferimento ai movimenti del corpo, idealmente sottesi ad ogni atto di produzione sonora, e le relative anticipazioni

¹⁷ *Ivi*, p. 130.

¹⁸ Cfr. in part. FRANCISCO J. VARELA – ELEANOR ROSCHT – EVAN THOMPSON, *The Embodied Mind Cognitive Science and Human Experience*, The MIT Press, Cambridge and London, 1991; GEORGE LAKOFF – MARK JOHNSON, *Philosophy in the Flesh: The Embodied Mind and its Challenge to Western Thought*, Basic Books, New York 1999.

sensoriali ad attivare una disambiguazione dell'informazione percepita. In altre parole, il coinvolgimento corporeo-gestuale assicura la possibilità di strutturare una relazione più trasparente tra input ed output, contribuendo al costituirsi di un sistema di attese maggiormente condiviso tra produzione e fruizione del suono.

Secondo l'EMC, oltre al coinvolgimento corporeo, la dimensione del riconoscimento predittivo si nutre anche di tutta una serie di condizioni ambientali. Al proposito, il modello sviluppato da Marc Leman,¹⁹ basato sulle nozioni di percezione diretta, inferenza, ciclo azione-reazione e risonanze, ha mostrato come i processi di azione/percezione possano disambiguare le relazioni stimolo-fonte incontrate nell'ambiente:

Furthermore, through action, humans are able to turn physical energy into action-relevant concepts and cultural artifacts. Resynthesis and imitation of action-relevant values of physical energy play a key role in the construction of a culture. Action thus forms a basic component of culture. It allows the creation of cultural artifacts, of technology, of the sharing of attention on goals, intentions, and significations.²⁰

Tale modello ecologico implica quanto il coinvolgimento con la musica sia inserito in una dinamica di vincoli multipli che si influenzano a vicenda, che rende il modello complesso e la cui dinamica presuppone un'interazione culturalmente 'risonante' tra le diverse componenti di quel modello medesimo.

Portando avanti tali prospettive, Arnie Cox propone una strutturazione dei processi di ascolto basata su incarnazione, imitazione e pensiero metaforico. Alla base della teoria si trova l'ipotesi mimetica in virtù della quale la cognizione musicale non può prescindere dall'azione motoria mimetica (attiva o immaginata) e dalle forme di ragionamento metaforico e riferibile ai significati. Questo implica che, da un lato, l'esperienza senso-motoria vincoli fortemente la nostra capacità di pensare la musica, e, dall'altro, che le metafore attraverso cui ci si relaziona con la nostra disciplina, svolgano un ruolo cruciale nel processo di significazione musicale.²¹

¹⁹ Cfr. MARC LEMAN, *Embodied Music Cognition and Mediation Technology*, The MIT Press, Cambridge, MA 2008; ID. – PIETR-JAN MAES, *Music Perception and Embodied Music Cognition*, in *The Routledge Handbook of Embodied Cognition*, Routledge, London 2014, pp. 81-88.

²⁰ *Ivi*, p. 76.

²¹ ARNIE COX, *Music and Embodied Cognition: Listening, Moving, Feeling, and Thinking (Musical Meaning and Interpretation)*, Indiana University Press, Bloomington 2016.

Nello specifico, la lettura della *embodied cognition* proposta da Leman e da Cox risulta particolarmente feconda per il contesto da cui muove la presente ricerca poiché permette di giustificare, a livello teorico, quanto il gesto sonoro risulti essere profondamente radicato nelle strutture percettive ratificate culturalmente, finendo per giocare un ruolo essenziale anche nella musica elettroacustica, in cui il gesto è presunto, o per utilizzare la terminologia di Smalley, sottoposto ad una *surrogazione di terzo* e di *quarto ordine (remota)*. La surrogazione di terzo ordine si ha quando un gesto viene immaginato o desunto senza che vi sia una certezza sulla sua causa, mentre la surrogazione remota allude a delle tracce gestuali all'interno di una sostanziale inconoscibilità e irriconoscibilità della fonte, ormai completamente sottratta ad ogni legame con l'umano. Ma proprio in queste tracce disperse di gestualità si possono trovare legami con la dimensione archetipica di una gestualità primordiale non ancora espressamente musicale che viene definita *surrogazione di primo livello*, essendo il *secondo livello* tipico di una gestualità musicale socialmente ratificata. Ed è proprio in questo richiamo alla fonte di ogni gestualità possibile che la musica elettroacustica, quando sembra essere più lontana dall'umano, si congiunge, invece, con l'umano stesso, ribadendone la centralità in maniera ellittica e, appunto, sostanzialmente ambigua.²²

La fecondità creativa di tale ambiguità strutturale che, al contempo, è anche fragilità ed incertezza del dato percettivo, viene colta in tutta la sua pienezza dalla modellizzazione fisica. Così, le gestualità scaturite dall'ampia topologia degli strumenti virtuali vengono lette, anch'esse, all'insegna di tale relazione percettiva che si fonda sulla dimensione corporea, seppur mediata, e sulla sua metaforizzazione culturalmente orientata.

In tal senso, la concettualizzazione di azioni e strumenti nel virtuale attuata da Kojis mediante un'analogia tra i meccanismi d'azione del modello fisico – l'interazione eccitatore-risonatore necessaria alla creazione del suono – e l'azione del mondo reale necessaria per l'uso di oggetti/strumenti musicali,²³ risulta particolarmente utile ad aprire a un'ampia significazione del virtuale, in virtù della quale dal meccanismo d'azione

²² SMALLEY, *La spettromorfologia: una spiegazione delle forme del suono* cit., pp. 132-134.

²³ Cfr. JURAJ KOJS – STEFANIA SERAFIN – CHRIS CHAFE, *Cyberinstruments via Physical Modeling Synthesis: Compositional Applications*, «Leonardo Music Journal», XVII (2007), pp. 61-66; KOJS – SERAFIN, *Augmenting Sonic Reality. Cyberinstruments Designed with Digital Waveguides*, «Digital Creativity», XIX (2008), pp. 77-90.

del modello scaturiscono, come visto nel secondo capitolo, un'ampia varietà di soluzioni esecutive, di azioni della quotidianità, di gesti appartenenti ai più specifici ambiti esecutivi, di interfacce che rimandano a gesti esecutivi consueti e/o del tutto distanti da modalità consolidate.

Ne consegue che i meccanismi di produzione del suono del modello – che implicano la replica di meccanismi esistenti e la loro estensione oltre i limiti del mondo fisico, fino alla creazione di azioni e meccanismi non esistenti nella realtà fisica – e conseguentemente, i gesti, o – nell'accezione più ampia ma in questo contesto sostanzialmente analoga – le azioni implicate nella messa in atto del modello, rimandino inevitabilmente alle modalità di surrogazione del gesto codificate da Smalley.

Implicando processi di interazione con lo strumento – sia dal punto di vista della produzione, sia dal punto di vista della percezione – anche molto differenti, tutte le gestualità strumentali, pur all'interno di una propria strutturazione e funzionalità specifica, testimoniano, nell'insieme, di una relazione fondante con i processi di astrazione del reale. Tali processi, che è possibile articolare, analogamente agli strumenti virtuali, secondo il modello introdotto da Kois di azione estesa, ibrida e astratta, si collocano in ambiti di piena congruenza/incongruenza con il mondo fisico,²⁴ producendo risultati percettivi differenti e ambigui, i quali rimandano alla complessa relazione con la fonte, analizzata da Smalley. Ancora una volta, il richiamo al diagramma generale 3.1. sintetizza, nell'immediatezza dell'immagine, la nostra lettura. È possibile, così, abbracciare, con un unico sguardo, il processo di allontanamento dal reale assieme alla schematizzazione delle gestualità correlate.

Rileggere, dunque, le declinazioni differenti di allontanamento della replica del modello dal reale, così come è stato ripercorso, relativamente agli strumenti, nel secondo capitolo, risulta essere una strategia utile a dar conto di quanto i gesti che si dipanano nel confine assai sfumato tra reale/virtuale, analogico/digitale possano, anch'essi, contribuire, nella molteplicità degli assetti analizzati nel corso della ricerca, a indagare la complessa relazione, sia a livello della ricaduta performativa del modello, sia

²⁴ Sul concetto di congruenza/incongruenza con il mondo fisico cfr. in part. KOIS, *The Language of Action and Cyberaction-based Music: Theory and Practice*, «Journal of New Music Research», XXXVIII (2009), pp. 285-294.

a livello della sua percezione, tra la dimensione del reale e la dimensione della modellizzazione.

Così, le azioni virtuali che estendono il modello – in base a simulazioni di processi fisici di natura unidirezionale congruenti con il mondo fisico – possono essere idealmente accostate al livello di surrogazione di secondo ordine, che rimanda a modalità della performance, le quali, seppur alterate, sono ancora riconoscibili in base a consuetudini culturalmente ratificate. Le azioni ibride, invece, di natura multidirezionale ed incongruenti con il mondo fisico, implicando la ristrutturazione e la suddivisione del flusso energetico del modello, provocano incertezza sulle modalità in cui il suono è stato prodotto e sulla traiettoria di movimento-energia applicata, potendosi accostare al livello di surrogazione di terzo ordine. Infine, le azioni virtuali astratte, che implicano processi di trasduzione di energia all'interno di sistemi che producono suono partendo da elementi direttamente materiali ed in cui qualsiasi entità può vibrare in un ordine del tutto fluido e arbitrario, trascendendo l'ordine del mondo per costituire una realtà del tutto altra, possono leggersi secondo il livello di surrogazione di quarto ordine (surrogazione remota), in cui, in virtù della totale lontananza dal gesto, dalla fonte e dalla causa, ormai divenute sconosciute e inconoscibili, scompare ogni traccia di attività umana soggiacente al suono. In realtà, però, come si vedrà nel prosieguo del capitolo, quest'ultimo livello, in una sorta di circolarità ideale, si ricongiunge ellitticamente al primo, costituito da una sonorità svincolata da un contesto musicalmente organizzato, nel senso che, laddove il riferimento a ciò che risulta essere culturalmente ratificato si fa incerto e sfuggente fino a diventare assente, il legame con la fonte si costituisce nel ritornare ad una sorta di archetipica gestualità che esorbita da ogni contesto culturalmente definito.

Per illustrare più in dettaglio la prima categoria degli strumenti estesi, si prenderà in esame, in primo luogo, la composizione *Corda di Metallo* (§2.2.1.1) di Michelangelo Lupone, poiché le soluzioni gestuali utilizzate dall'autore, attraverso il dialogo instauratosi tra il mondo acustico e quello virtuale, si pongono inequivocabilmente all'interno del secondo livello di surrogazione di Smalley, pur nell'ambiguità che deriva dall'intreccio di gestualità note con altre del tutto inedite provenienti dall'interazione tra strumenti acustici e modello. Nel brano, il compositore partendo dal controllo dei

parametri del modello fisico (tensione delle corde, smorzamento interno e dell'aria, velocità, pressione e posizione dell'arco), instaura una continuità tra i gesti usuali dello strumentista ad arco e gesti esecutivi altri, al di fuori della gamma dei parametri fisicamente possibili,²⁵ sebbene risultino tutti congruenti con il mondo fisico, come congruente con il mondo fisico risulta la sostituzione dell'archetto con dei dischi rotanti, implicati dal modello, che consentono di modellizzare l'arcata sulle caratteristiche della corda estesa.²⁶ *Silicon Valley Breakdown* di David Jaffe dimostra (§ 2.2.1.3), invece, una serie di possibilità compositive consentite dall'implementazione dell'algoritmo Karplus-Strong: oltre alle note troppo veloci per un esecutore umano, sono possibili complesse ed intricate strutture temporali come i canoni del tempo sinusoidali – in cui le parti iniziano insieme, divergono nel tempo e arrivano, poi, alla perfetta sincronizzazione –, e, anche, strumenti immaginari, impossibili da realizzare nel mondo reale, come, ad esempio, la riproduzione sonora del pizzicato degli archi ottenuto dalla modellizzazione dei cavi di supporto del *Golden Gate Bridge*. In *Wadi Musa* di Juan Reyes (§ 2.2.1.9) la modellizzazione della performance della maraca, descritta dalle leggi fisiche che governano i movimenti del corpo umano e la tensione muscolare, avviene attraverso il controllo espressivo del parametro della durata, che si struttura in schemi poliritmici identitari generatori di nuovi gesti che oscillano tra temporalità ultra lente e ultra veloci, a cui si associano cambiamenti nello spettro. Tale gestualità si costituisce nella dialettica che contrappone le diverse tipologie di sonorità tipiche dello strumento su scalarità ritmiche che esorbitano le possibilità umane, seppur all'interno di uno schema gestuale osservabile nella realtà.

Questi tre esempi, tra i molti possibili, pur nella loro diversità di modellizzazione, sono accomunati dall'utilizzo di simulazioni di processi fisici, che si ricollegano a sonorità culturalmente ratificate, il cui risultato è frutto di una solida e naturale coerenza strutturale del modello. Le gestualità impiegate, usate per estendere le possibilità timbriche di strumenti fisici esistenti, costituiscono una realtà aumentata che si genera dall'intreccio, nell'esecuzione, di strumenti virtuali e strumenti reali, in cui l'ascoltatore

²⁵ LORENZO SENO, *La sintesi del suono*, in <<http://www.acustica.org/ex-mnt/sintesi/archetto.htm>> (accesso 20-12-202).

²⁶ SENO, *Sintesi per modelli fisici. Verso una semantica dei suoni*, in http://www.acustica.org/sem_suoni.html (accesso 20-12-2020).

è costantemente sfidato ad individuare, a livello percettivo, se il materiale presentato sia acustico o virtuale.

Le gestualità estese, tra realtà ed astrazione, sono state efficacemente sfruttate per creare spazi di risonanza virtuali, come nel caso di *That which is bodiless is reflected in bodies* di Matthew Burtner (§ 2.2.1.8) in cui il modello di una campana tibetana viene esteso fino a coincidere con la totalità dello spazio fisico, creando uno spazio in cui l'ascoltatore è totalmente immerso. L'idea di un modello di risonatore di uno strumento virtuale – che agisce come un mezzo attraverso il quale trasmettere sia il suono reale che quello astratto – rimanda alla nozione di paesaggio, proposta da Trevor Wishart, per denotare il nostro riconoscimento della presunta (cioè immaginata o reale) fonte sonora,²⁷ in cui è possibile separare il riconoscimento del suono in quanto oggetto, dallo spazio acustico percepito in cui tali oggetti sonori risiedono:

The output of the modes are coordinated in a spatial configuration surrounding the listener. As the modes change, the spatial location of the signal changes accordingly. *That which is bodiless is reflected in bodies II* draws the listener close to and then inside the acoustics of the resonating bowl. Once inside the bowl, the modes are multiplied generationally, and the sound environment diverges from any physical representation, becoming an abstract auditory environment built from waveguide networks. *That which is bodiless is reflected in bodies II* offers an initial example of how physically-based modal waveguide synthesis can function as an extended technique in combination with spatial processing.²⁸

Così, Burtner sfrutta le gestualità per produrre una saturazione percettiva creata dallo strumento reale, eseguito con azioni coerenti al mondo fisico, e da uno spazio acustico artificiale, spettralmente coerente con l'oggetto modellizzato e continuamente mutato nella forma e nelle dimensioni durante l'esecuzione: gli altoparlanti intorno al bordo della cupola corrispondono ai nodi di risonanza della ciotola tibetana presente sulla scena esecutiva – con il pubblico disposto al centro, come fosse dentro una ciotola gigante – fornendo l'opportunità di diffondere la musica su una configurazione multicanale spettralmente motivata dei materiali sonori.

²⁷ TREVOR WISHART, *Sound Symbols and Landscapes*, in *The Language of Electroacoustic Music*, ed. by Simon Emmerson, Macmillan, London 1986, pp. 41-60.

²⁸ CHRIS BURNS –SERAFIN – MATTHEW BURTNER, *Musical Applications of Generalised Multichannel Digital Waveguides*, in *Proceedings of the Stockholm Music Acoustics Conference (SMAC 03)*, Stockholm 2003, pp. 1-4:3.

Tale processo è interpretabile secondo il concetto di spazio immersivo di Denis Smalley: «The filling of spectral and perspectival space in circumspace so that the listener feels immersed in the image».²⁹ Mediante tale immersione, il gesto si trasfigura in uno spazio spettrale e prospettico che si estende fino a circondare il soggetto, il quale, a sua volta, non essendo attratto da alcuna direzione precisa, è sollecitato ad adottare punti di ascolto diversi e molteplici.

Nelle azioni virtuali ibride – caratterizzate, invece, da percorsi multidirezionali, che sovvertono l'ordine naturale delle interazioni fisiche –³⁰ si incontra una gestualità del tutto altra, come, ad esempio, in *Air Study I* di Gary Scavone, in cui la pressione esercitata sull'ancia di un sassofono, prodotta dal soffio all'interno dello strumento, eccita e controlla una coppia di corde virtuali. L'ibridazione di due strumenti diversi produce una proliferazione timbrica del tutto inedita, la quale, scaturita da un'interazione gestuale che, sebbene impossibile a prodursi nel mondo reale a causa dei vincoli fisici, risulta, comunque, immaginabile, può essere letta richiamando la surrogazione di terzo ordine, di Smalley, che mette in risalto l'incertezza e l'ambiguità della fonte sonora.

La capacità di costruire strumenti virtuali arbitrariamente complessi, a partire da blocchi di costruzione più elementari, permette, dunque, di esplorare una tavolozza ricca e diversificata di possibilità spettrali. Inoltre, poiché il risultato è espresso in termini di informazioni modali, si ha l'opportunità aggiuntiva di utilizzare queste ultime per determinare decisioni 'armoniche', collegate direttamente alle caratteristiche spettrali dei suoni prodotti in risposta all'eccitazione e alla raccolta della risposta vibratoria dello strumento virtuale in punti arbitrari lungo la sua superficie. Tali blocchi non vengono, dunque, utilizzati solo come generatori di suoni, bensì rivestono anche uno scopo funzionale nel determinare il contenuto spettrale e la forma del brano. Tuttavia, nel contesto della modellizzazione, l'idea di suono e di timbro che si integrano nel processo compositivo – finendo per coincidere con la composizione del suono e del timbro stesso, in continuità ideale con il lavoro di Risset che ha dimostrato tutto il potenziale della sintesi sonora digitale per la creazione di materiali idiosincratici fondanti procedimenti

²⁹ SMALLEY, *Space-form and the Acousmatic Image*, «Organised Sound», XII, (2007), pp. 35-58: 55.

³⁰ Cfr. JURAJ KOJS, *Cyberactions and Cyberinstruments via Physical Modeling Synthesis: Extending Musical Realities*, Ph. D Thesis, University of Virginia 2008, pp. 27-28.

di costruzione della forma³¹ – si traduce in termini spettromorfologici: le interazioni tra gli spettri sonori e i modi in cui questi ultimi cambiano e vengono plasmati attraverso il tempo si interpretano come il mezzo mediante il quale identificare la presunta fonte di provenienza dei suoni, piuttosto che nel contesto dell'armonia, come sarebbe tipico, ad esempio, della composizione spettrale. Così, tali dinamiche spettrali, generantesi nell'incrocio arbitrario dei modelli ibridi, articolano la forma su di un altro piano, ricreando, mediante l'accento sulle caratteristiche timbriche e microstrutturali distintive del suono, la complessità del reale e permettendo all'ascoltatore di ricongiungersi con il mondo dell'esperienza vissuta.

Tutti gli esempi sopra discussi, sebbene composti sia da gesti congruenti con il mondo fisico, sia da gesti incongruenti con il mondo fisico, rimangono nel dominio della plausibilità, nutrita da quell'ambiguità-incertezza che rimanda al secondo e al terzo livello di surrogazione gestuale, per riallacciarsi, ancora una volta, alla terminologia di Smalley.

Le azioni astratte, invece, pur essendo, anch'esse, fisicamente plausibili, sono sovra-congruenti con il mondo fisico, nel senso che, all'interno di sistemi caratterizzati dalla trasduzione di energia da cui emergono sequenze temporalmente organizzate tra componenti della più diversa natura, situandosi interamente nel dominio del virtuale, creano un mondo altro che agisce ad un livello sovra-ordinato rispetto al mondo fisico [diagr. 3.1]. Assemblando particelle elementari si può ottenere un modello in grado di sintetizzare suoni che non hanno assolutamente alcuna controparte reale, cosicché un modello basato sulla fisica può essere considerato come un 'generatore di realtà musicale', interpretabile, qui, mediante un processo di metaforizzazione degli oggetti reali.

Come Cadoz ha dimostrato, si può ottenere una successione di eventi sonori, piuttosto che un suono isolato, assemblando, in una struttura complessa, sia modelli ad alta frequenza che generano il suono, sia modelli a bassa frequenza che generano eventi sonori (il gesto). Esempio, a proposito, *pico..TERA* (§ 2.2.2, 2.2.2.1) brano interamente

³¹ «In my view, grammatical constraints such as the serial techniques are too arbitrary in the harmonic dimension. With synthesis, one can compose spectras and timbres just as musical chords, and one can attribute a harmonic function to timbre» in RISSET, *Computer Music: Why?*, Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, CNRS, Marseille s.a., p. [2].
<https://liberalarts.utexas.edu/france-ut/_files/pdf/resources/risset_2.pdf>, (accesso 11-12-2020), p. 6.

generato, in Genesis, da un singolo modello, senza alcun post-processing, in cui il musicista è in grado di costruire i propri generatori di eventi su due livelli, audio e gestuali, della creazione musicale, fino all'organizzazione di una macro-gestualità che controlla ogni aspetto della forma.

Le azioni implicate nello strumento virtuale astratto si rivelano, così, essere dei principi organizzativi che influenzano ogni aspetto della creazione musicale, dalla composizione, all'esecuzione, all'ascolto. Ogni possibile struttura vibrante, particella o fenomeno, nelle sue forme latenti e attive, all'interno di un sistema fluido di trasduzione di energia, può essere fonte di un'azione attivabile in qualsiasi fase, abbandonando, così, il tradizionale flusso tra composizione, esecuzione e ascolto: l'ascolto, ad esempio, può avviare la vibrazione e mettere in moto le altre componenti dell'azione; la forma di uno strumento può divenire la forma della composizione o, ancora, uno strumento può 'colpire' un esecutore

Tutti gli aspetti dell'azione condividono la stessa struttura sonora, costruendo, così, una gestualità del tutto fluida, trascendente i vincoli del reale, che rimanda alla surrogazione remota: il gesto riconnesso alla sua funzione archetipica premusicale che utilizza tutte le potenzialità della metafora. Combinazioni e trasfigurazioni di suoni riconoscibili attingono alle associazioni e alle esperienze culturali e ambientali degli ascoltatori in modi che possono generare metafore ed evocare simboli. Così, la metafora agisce come un meccanismo compensativo, a livello soggettivo, grazie al quale è possibile ricostruire un rapporto esperienziale culturalmente orientato con l'ignoto, che può essere decifrato e fruito.

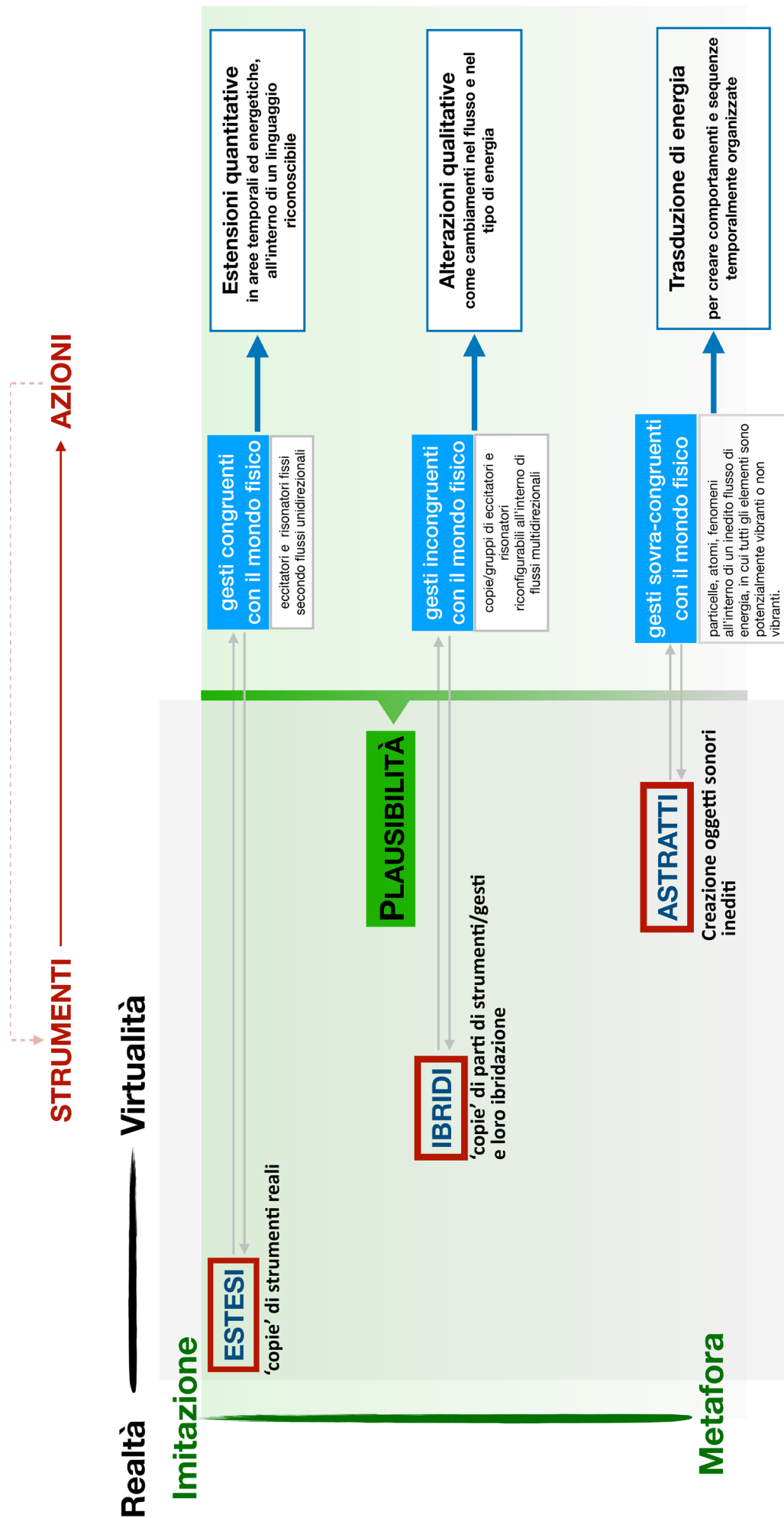


Diagramma 3.1 Corrispondenza tra strumenti virtuali e azioni, articolate in funzioni interne, direzionalità e flussi di energia

3.4 Spazi compositivi tra il concreto e l'astratto

Se, come si è visto, il concetto di plausibilità fisica è in relazione al livello di realismo attribuibile ad un suono sintetizzato, quest'ultimo si situa all'interno di un *continuum* le cui polarità sono costituite, da un lato, dai suoni immediatamente riconoscibili come fossero di natura fisica, e, dall'altro, a quelli che, non potendo essere chiaramente associati a un'interazione fisica definitiva o a un oggetto materiale, richiamano un'astrazione totale. Tale astrazione è interpretabile come la distanza psicologica tra un suono che mostra un'ambiguità fonte-causa e un modello fonte-causa presunto,³² fornendo un *medium* per navigare tra i diversi livelli di surrogazione. Il compositore che opera con gli strumenti virtuali si colloca all'interno di questo *continuum*, che si rivela un utile costrutto concettuale per riconoscere la realtà/astrattezza di un suono sintetizzato, il mantenersi nel dominio del plausibile oppure il suo progressivo trascendere mediante l'uso sempre più pervasivo e totalizzante della metafora. L'agire metaforico si intensifica propriamente nella tensione verso l'astratto, mentre, inversamente, tende a ridursi laddove la riconoscibilità del suono appare più immediata ed intrinsecamente evidente: ne consegue che plausibilità fisica e tensione metaforica sembrano, dunque, concetti che si relazionano secondo il principio di proporzionalità inversa.

Il concetto di metafora si costituisce nel rapporto di somiglianza tra campi di immagine sonora che legano il suono propriamente udito al suono reale cui quest'ultimo si riferisce. Quanto più la relazione tra queste due immagini sonore è direttamente riconoscibile, tanto più si privilegia la polarità del *continuum* relativa alla natura fisica del suono; mentre, inversamente, quanto più la relazione appare ellittica, mediata e straniente tanto più si gravita nei territori della polarità opposta dell'astrazione. Così, sebbene secondo diversi gradi di interrelazione, la metafora si costituisce nella somiglianza fino a un livello completamente astratto, in cui le gestualità modellizzate – che rappresentano il flusso di energia da un'entità all'altra all'interno di un sistema del tutto altro – costituiscono gli spunti percettivi che, partendo da una natura materiale,

³² JOHN YOUNG, *Imagining the Source: The Interplay of Realism and Abstraction in Electroacoustic Music*, «Contemporary Music Review», XV (1996), pp. 73-93: 79.

ricostruiscono un legame col mondo dell'esperienza: il livello remoto di surrogazione di Smalley.

È la natura stessa del suono modellizzato fisicamente che, fondato sulle gestualità, mette al centro dei meccanismi compositivi la dimensione percettiva, travalicando, in tal modo, il processo tecnico per rivalutare tutte le implicazioni della creatività musicale, che si costituisce nella interrelazione con il soggetto percipiente. Così, 'sfuggire al plausibile' significa disimpegnare lo schema percettivo disponibile, senza ignorare, comunque, la necessità di un ancoraggio percettivo altro, come sottolineato anche da John Young:

While recognisable sounds can be surrealistically combined to create metaphorical meanings, the distinctions between degrees of Reality and abstraction can also be taken as a broad metaphor for "outer" and "inner" forms of experience: the tangible and intangible, even "physicality" and "spirituality". In the acousmatic medium of electroacoustic music "Reality" and "abstraction" are notional absolutes, which may appear to the listener to be in constant flux and with distinctions is not always clear-cut, since judgements about sound sources are not able to be verified visually, and signal processing can undermine the interplay of recognitional cues in natural sound events at different levels. Therefore, the range of ambiguous states between these two polarities form a continuum, within which there are not necessarily fixed or absolute increments. The notion of a continuum is significant in that it indicates a perceptual level at which relationships between materials are judged in a continuous dimension, and one which is particularly powerful since it is bounded by psychological opposites.³³

All'interno di tale *continuum*, osserva inoltre Young, sono possibili due diverse articolazioni di realtà ed astrazione denominate 'mediazione' e 'giustapposizione'. La mediazione si verifica mediante degli spostamenti gradualmente nell'ordine di surrogazione, che vengono avvertiti in termini di un divenire progressivo di un certo numero di identità sonore distinte, oppure come trasformazione di un'identità specifica; la giustapposizione, invece, utilizza una combinazione di sonorità tipiche sostanzialmente polarizzate, che operano sia in sequenza, sia contemporaneamente.³⁴ Nei contesti musicali, tali articolazioni possono vivere l'una accanto all'altra non escludendosi

³³ Ivi, pp. 83-84.

³⁴ Ivi, p. 84.

vicendevolmente, cosicché l'attenzione dell'ascoltatore può gravitare liberamente da un tipo di articolazione all'altra, all'interno di una stessa opera.

Virtual String (1997), di Achim Bornhoeft (§ 2.2.1), fornisce un significativo esempio della gestione del *continuum* realtà-astrazione su larga scala, segnato dalla transizione verso suoni realistici da materiali di terzo ordine e surrogazione remota. Il software usato per questo brano (VSTRING) dota il modello fisico di una corda di un'interfaccia grafica i cui diversi cursori ne controllano la tensione, la rigidità o lo smorzamento, il tipo e la posizione della corda, la risposta in frequenza e la posizione del pick-up virtuale posto su di essa. Le diverse transizioni d'identità, realizzate attraverso la molteplicità di movimenti degli slider, utilizzate in successione per la realizzazione del tape, ricordano la tecnica di animazione di un cartone animato.

Tutschku, in *Eikasia* (§ 2.2.1), partendo dall'idea di ricreare la complessità sonora di una fonte reale attraverso la sintesi pura, confronta i modelli sintetizzati con i suoni originali, creando una grande tavolozza sonora che va dall'astratto al reale. L'intero brano utilizza piatti accordati a spettri di corde e corde accordate a spettri di piatti. Il compositore incrocia i processi di analisi e di sintesi, analizzando le corde basse del pianoforte per poi accordare tutti i modi di vibrazione delle placche circolari e rettangolari allo spettro del pianoforte e viceversa. La struttura formale è il risultato della complessità dei suoni: ad esempio, le sezioni 2, 3, 6, 7, 8, 11 e 12 iniziano con attacchi metallici le cui risonanze cambiano di frequenza – un gesto compositivo esteso questo, del tutto svincolato dalla realtà –, elementi questi che producono un accumulo di struttura e di materiali sonori. Durante gli ultimi 30 secondi, infatti, gli attacchi metallici con risonanze in glissando, usati in precedenza come articolazioni della struttura temporale, si fanno sempre più densi, arrivando ad un attacco finale a 12:05, in cui è chiaramente identificabile l'utilizzo di una piastra metallica accordata allo spettro di un pianoforte.

In *Garden of Dragon* di Kojs, il modello di un tubo corrugato, implementato come estensione dell'ambiente Max/MSP in tempo reale, espande le possibilità dei tubi fisici in diverse aree: vibrato, controllo dell'altezza e dell'ampiezza, e rapporto rumore/pitch.

I tubi acustici controllano un coro di tubi virtuali usando un tracker di Max/MSP per creare una interrelazione simbiotica tra le due dimensioni.³⁵

Se tali progetti si collocano sul crinale percettivo che separa/unisce il reale e l'astratto – mediante modelli che ne interpretano creativamente la transizione, all'interno di un *continuum* spaziale –, numerosi altri si collocano apertamente in zone astratte, all'interno delle quali i modelli possono entrare in stati marginali e caotici in cui l'output musicale è articolato e spesso sorprendente. Ciò avviene, ad esempio, in *Hero and Leander*, di Chris Burns³⁶ – incentrato su una di rete di feedback che produce sonorità emergenti articolate e del tutto imprevedibili. Oppure, combinazioni poliritmiche si producono in *Wadi Musa* di Reyes, come risultato della flessibilità del modello, che consente di generare timbri diversi che vanno dalle maracas di legno o di plastica con parti sintetiche, ai tamburelli e ai carillon, assemblati in combinazioni caotiche che fanno interagire durate, velocità di scuotimento, quantità di semi e risonanze del guscio delle maracas.

I modelli più astratti sono composti da reti di moduli interagenti, che rispondono esclusivamente alle proprietà specifiche delle parti che li costituiscono e delle loro modalità di combinazione: allontanandosi in tal modo da ogni riferimento noto fanno emergere sonorità astratte sovra-congruenti con la realtà fisica che, sebbene possano conservare tracce della loro origine, necessitano di essere apprese ex novo. Ciò che li caratterizza è, dunque, l'emergenza delle sonorità che scaturiscono da un agire compositivo che si muove preferibilmente nella creazione del mezzo e nella sua messa in atto piuttosto che sull'effetto: il suono emerge fino a sorprendere con sonorità del tutto impreviste, di per sé autonome e ben radicate nella fisicità dei meccanismi che le generano.

Tale modalità di procedere costituisce un *physical thinking* che può raggiungere la complessità del suono naturale attraverso processi di pura sintesi, come, ad esempio, esplicitamente dichiarato da Tutschku a proposito della sua sopracitata *Eikasia*,³⁷ oppure

³⁵ STEFANIA SERAFIN – KOJS, *The Voice of the Dragon: A Physical Model of a Rotating Corrugated Tube*, in *Proceedings of the 6th International Conference on Digital Audio Effects (DAFx-03)*, London 2003 [5 pp.].

³⁶ Cfr. CHRIS CHAFE, *Case Studies of Physical Models in Music Composition*, in *Proceedings of the 18th International Congress on Acoustics*, Kyoto 2004 [5 pp.].

³⁷ «*Eikasia* is my first work with physical modeling. In all my previous electroacoustic pieces, I used processed recorded sounds. My research was to reach a sound complexity with pure synthesis

derivare un suono emergente da un oggetto preesistente, come in *Sonomorphis*, installazione interattiva 3D di Torsten Belschner e Bernd Lintermann (§ 2.2.1.6), in cui viene utilizzata una tecnica di modellizzazione fisica in grado di rendere sia il suono genuino di un oggetto visibile attraverso tutte le plausibili alterazioni nella forma e nello spazio introdotte dall'utente, sia di essere sufficientemente astratto, laddove necessario, per non duplicare un artefatto del mondo reale: è un modo di immaginare e progettare la musica derivato dall'esperienza, ma con un percorso che travalica l'esperienza medesima. I sistemi più astratti, infatti, vengono appresi osservandone la risposta agli stimoli e al cambiamento delle condizioni. Eccitare un tale modello è come eccitare un nuovo strumento, e l'eccitazione stessa (un atto fisico reale o immaginato) può essere composto o organizzato algebricamente.

Cadoz estende quest'unico paradigma alla sintesi del suono e alla composizione assistita dal computer. La costruzione di un brano all'interno di tale approccio si fonda sulla costruzione di categorie di componenti – gli 'strumenti' e gli 'esecutori', corrispondenti a due scale temporali diverse, quella della microstruttura e quella della macrostruttura – che mettono insieme e collegano elementi che sono definiti al di fuori del tempo (i diversi MAS e le interazioni).³⁸ Tali componenti, pur non essendo oggetti temporali, generano eventi temporali: componendo gli oggetti, il compositore gode di una totale libertà nella scelta delle loro proprietà. Agendo su questo asse di libertà, egli può applicare scelte arbitrarie o regole di qualsiasi tipo: ad esempio, per l'insieme degli otto *triangles*, strumenti utilizzati in *pico..TERA* per lo sfondo armonico, è stata impiegata una legge pragmatica fondata non sulle altezze, ma sulle loro proprietà topologiche, creando un'armonia di cause e non di effetti:

The TRIANGLES are characterized by their number of lines; 15 lines for the larger one. One can know their spectral structures, using the analysis module in GENESIS. And it is possible to tune the TRIANGLES in order to constrain each of them to correspond to a given pitch in a chord. Having tried this, we noted that the chords sounded very poorly. Indeed, this "composition" is not consistent since it put together features that are strangers to each other. Then, we adopted another approach focussed also on simple ratios, but not on the

comparable to natural sounds», HANS TUTSCHKU, *Portfolio of Compositions*, PhD. Thesis, The University of Birmingham 2003, p. 9.

³⁸ Si vedano, al proposito, i capitoli I e II.

pitch: on the topologic sizes. By giving to the TRIANGLES, made with the same "matter" (values of M, K and Z parameters) several sizes in simple ratios (15, 12, 9, 7, etc.), we obtained chords that have nothing to do with any classical chord (the frequencies are in quite complex relations) but that sound consistently in the various expositions we can do. The consistency is here a result of a simple law applied to the physical properties of the objects, i.e. to the cause rather than the effect.³⁹

Tutti i processi di costruzione risultano, dunque, possibili nei diversi livelli della struttura musicale, dalla generazione del suono alla composizione, poiché l'approccio della modellizzazione fisica offre la possibilità di strutturare nuove e complesse modalità, che innescano una relazione intima tra i diversi livelli gerarchici, aprendo ad un nuovo paradigma: la gestione degli incontri interattivi tra le diverse scalarità, in cui le scale stesse non sono concepite esclusivamente in termini di strutture temporali, ma possono essere anche fenomenologiche e causali. Così, un unico paradigma fondato su un numero molto ridotto di concetti e di funzioni di base può essere utilizzato per la costruzione musicale, dalla micro alla macrostruttura, senza rotture, provocando uno spostamento radicale del focus: il punto di partenza della modellizzazione fisica, costituito dal pensare e dall'agire sulle cause piuttosto che sugli effetti, viene ora applicato alla totalità dei parametri che costituiscono la creatività musicale:

This puts forth a strange question: what is the cause of a complex musical event? If we remain with a skimpy understanding of the notion of "cause", this question might be ridiculous. But if we think of the physical models as a general and powerful metaphoric formalism, this opens truly new ways of understanding and practicing artistic creation in the new technology context.⁴⁰

All'interno di tale paradigma compositivo – in cui un unico modello per la generazione delle varie categorie di fenomeni garantisce la coerenza energetica tra i fenomeni –, il concetto di 'emergenza' delle sonorità si fa più radicale, in quanto il suono si delinea in intima interrelazione con altre dimensioni della realtà virtuale, per cui l'oggetto sonoro

³⁹ CLAUDE CADOZ, *The Physical Model as Metaphor for Musical Creation: "pico..TERA", a Piece Entirely Generated by Physical Model*, in *Proceedings of the International Computer Music Conference ICMC 2002*, Gothenburg 2002, pp. 305-312: 311.

⁴⁰ *Ivi*, p. 312.

può essere contemporaneamente visto, ascoltato e manipolato, anche in tempo reale (§ 2.2.2). Brani di Cadoz quali *Hélios*, *Quetzalcóatl* (§ 2.2.2.3), tra i diversi possibili esempi di produzione del centro ACROE, sono emblematici di tale ridefinizione dell'atto compositivo, resa possibile dalla specifica creazione di *Hélicanthe*, la piattaforma per la creazione musicale e artistica multisensoriale, in cui il puro astratto 'si offre ai sensi' con oggetti inediti e nuove gestualità, all'interno in uno spazio nuovo, totalmente immersivo (§ 1.3.2.1).

L'emergere del suono da un oggetto del tutto scaturito dal virtuale e fondato, pertanto, su principi fortemente ancorati alla materialità del mondo fisico tende, paradossalmente, a radicarsi nella sensorialità, inscindibile fondamento che permette una efficace rappresentazione mentale del modello nella sua fruizione, ma, ancor prima, nella sua ideazione e nelle possibilità esplorative che ne derivano. Svincolato dai limiti fisici e corporei del reale, come pure svincolato da vincoli culturali, il modello fisico – grazie alla rete di interazioni sensoriali che lo rendono possibile, vivo e presente nella rappresentazione mentale – apre ad uno spazio compositivo, all'interno del quale virtuale e reale, imitazione e metafora, corpo e mente si intrecciano, divenendo polarità inscindibili e totalmente indagabili per esplorare l'inedito nella creatività artistica.

3.5 Tre casi di studio

3.5.1 Corda di Metallo di Michelangelo Lupone: una ricerca musicale e scientifica

Il compositore Michelangelo Lupone, con *Corda di metallo* (§ 2.2.1.2) per quartetto d'archi, sintesi basata su modelli fisici e dispositivo di spazializzazione, ha realizzato una delle prime e più interessanti esperienze sull'uso della modellizzazione fisica in ambito compositivo, mediante la simulazione di una corda eccitata con l'archetto, frutto della sperimentazione dell'équipe musicale e scientifica del CRM di Roma.⁴¹ Il brano, che costituisce un vero e proprio esempio di *liuteria virtuale*, testimonia quanto la natura dello strumento virtuale possa contribuirne alla ideazione e, di conseguenza, costruire linguaggio.

Da un punto di vista progettuale, la scommessa iniziale consisteva nel far interagire esigenze diverse, e non sempre facilmente assimilabili, facendo convivere, da un lato, le peculiarità della ricerca scientifica, e, dall'altro, quelle dell'espressione artistico-musicale. Se il progetto musicale ha, infatti, condiviso la metodologia scientifica, l'ha, però, circoscritta a quegli obiettivi specifici che caratterizzano la progettualità musicale dell'autore: la spazializzazione del suono, il modello fisico dell'arco e della corda, e la ricerca di inedite modalità d'emissione del suono:

La ricerca musicale, diversamente da quella scientifica, porge i suoi risultati sotto forma di rappresentazione e interpretazione soggettiva dei fenomeni, siano questi fisici, logici o psicologici. Il metodo e la misura possono derivare dalla teoria e dalla prassi scientifica, ma non sono mai indirizzati alla pura conoscenza, alla descrizione, tantomeno alla simulazione di un determinato accadimento.⁴²

Sebbene i confini tra il piano tecnico e il piano estetico possano essere fragili, per il primo gli oggetti sono dotati di una loro verità e di proprie qualità oggettive, laddove per il

⁴¹ L'intero progetto è stato sviluppato al CRM di Roma, con una équipe composta da Marco Palumbi (ingegnere) e Lorenzo Seno (fisico) per la modellizzazione fisica, Laura Bianchini, Maria Cristina De Amicis, Felice Cerone, Carlo Galletti e Marco Giordano, per la spazializzazione del suono e, infine, da David Harrington del Kronos Quartet, con il quale sono state sperimentate le tecniche di emissione del suono.

⁴² MICHELANGELO LUPONE, *Spazio, arco e metallo. Una ricerca musicale e scientifica*, «Quaderni della civica scuola di musica», XIV (1999), pp. 80-89: 80.

secondo sono, *ab origine*, in funzione di una coscienza intersoggettiva con la quale vengono ad essere strutturalmente in rapporto: è il costituirsi di effetti su un soggetto percipiente che caratterizza, infatti, la peculiarità dell'esperienza estetica, effetti che non solo devono essere prodotti, ma anche riconosciuti. Ciò motiva la consapevolezza critica con cui Lupone gestisce la relazione tra ricerca scientifica e ricerca musicale che deve porsi «obiettivi allineati concettualmente alle esigenze tecniche ed espressive della musica contemporanea.»⁴³ Ne consegue che le tecniche e le conoscenze derivate dalla ricerca scientifica non debbano essere utilizzate come espedienti fine a sé stessi o in modo 'estrinseco' e congiunturale, ma debbano testimoniare di una loro necessità strutturale:

Molta della musica oggi prodotta utilizza limitatamente i mezzi di pensiero avanzati messi a sua disposizione; la concezione armonica, timbrica, notale che sovrappone un linguaggio musicale tradizionale al nuovo mezzo evidenzia l'incosciente patrimonio culturale del musicista e la discrepanza tra idea e realizzazione. In altre parole, un'opera musicale contemporanea è in grado di approfondire ed estendere il patrimonio concettuale su cui poggia solo quando in essa troviamo un'idea compositiva che ha saputo utilizzare gli strumenti scelti per il suo manifestarsi, rendendo il mezzo necessario e insostituibile, sottoponendo le peculiarità strumentali ed esecutive di cui si avvale alla verifica del linguaggio musicale e delle intenzioni espressive che le hanno richieste.⁴⁴

Corda di metallo si costituisce proprio all'incrocio di tali problematiche, rappresentando un riuscito esempio di rinnovamento del linguaggio musicale operato in stretta interdipendenza con le acquisizioni della ricerca scientifica. Così, il modello fisico è il risultato di un lavoro di équipe, che, partendo dalle tecniche di modellizzazione più consolidate delle guide d'onda, avvia uno studio che possa superarne i vincoli di invarianza temporale, tipici di questa tecnica, al fine di ottenere delle modalità d'uso rispondenti alle necessità musicali espresse dal compositore. L'idea musicale, ancora in forma embrionale ipotizzava, infatti, un'esplorazione interna alla corda, al fine di mettere in evidenza le potenzialità timbriche del suo materiale costruttivo. Mettendo in atto una trasformazione spettrale, senza soluzione di continuità, dalla minugia al metallo, si intendeva sperimentare le potenzialità compositive delle variazioni acustiche

⁴³ *Ivi*, p. 81.

⁴⁴ *Ibidem*.

prodotte dai diversi rapporti tensione-densità, come pure quelle indipendenti di velocità, pressione e punto d'intervento dell'arco.

Partendo da tali intenti, i fisici Palumbi e Seno proposero una rilettura dell'equazione caratteristica della tecnica per guide d'onda, incentrata sulla tempovarianza delle equazioni descrittive dei parametri fisici,⁴⁵ le cui potenzialità sono state sfruttate dall'idea musicale, applicando delle funzioni di controllo a tutti i termini dell'equazione secondo una duplice strategia che ha condotto, da un lato, alla realizzazione delle modalità di emissione tipiche degli strumenti reali, seguendo i vincoli fisici della gestualità strumentale, e, dall'altro, alla realizzazione del nastro magnetico, seguendo i vincoli di coerenza derivanti dall'ordinamento dei materiali previsti dalla partitura.

Dalla lettura della partitura risulta evidente una scrittura altamente formalizzata, la quale fissa diverse modalità di emissione del suono e di gestualità esecutive proprie degli strumenti del quartetto, secondo il dipanarsi, nelle sezioni in cui sonorità fisiche e virtuali si incontrano, di una trama costruita sulla relazione di continuità/fusione delle sonorità della corda modellizzata con i suoni degli strumenti reali. La legenda [fig. 3.1] riporta una serie di simboli relativi alle tecniche utilizzate nell'opera: alcune impiegate da tempo nelle consuetudini del linguaggio contemporaneo, quali lo scorrimento microtonale, il pizzicato Bartók, il battuto di legno, il martellato; altre, invece, originali e originate dallo studio del modello fisico applicato alla sperimentazione sulle corde:

- un vibrato, lento/largo  o veloce/molto largo ;
- un *jéte* costituito da una pressione leggera ma costante e un movimento lento dell'arco ;
- una serie di oscillazioni regolari o irregolari intorno a un determinato intervallo;
- una sorta di *guitar-bending* , 'attaccandosi' alla corda per ottenere un vibrato sull'armonico;
- l'uso di una grande pressione sull'arco alla più bassa velocità possibile.

⁴⁵ L'equazione è, infatti, basata su un algoritmo di tipo 'elementi finiti', cfr. al proposito MARCO PALUMBI – LORENZO SENO, *Physical Modelling of Bowed Strings – a New Model and Algorithm*, in <http://www.acustica.org/metal_string.htm> (accesso 20-20-2020).

La transizione tra le differenti posizioni dell'arco – ponte (P), ponte centrale (PC), centro (C), bordo centrale (TC), tastiera (T) – da una posizione all'altra può avvenire gradualmente, oppure bruscamente. In altre occasioni, l'arco deve muoversi con moto circolare entro i limiti indicati (ad esempio da tastiera a ponte): . Mentre può risultare particolare anche la disposizione delle arcate come nel caso di un gruppo di cinque sedicesimi suonato up-down-up-down-up (usando l'arco come fosse una sega).

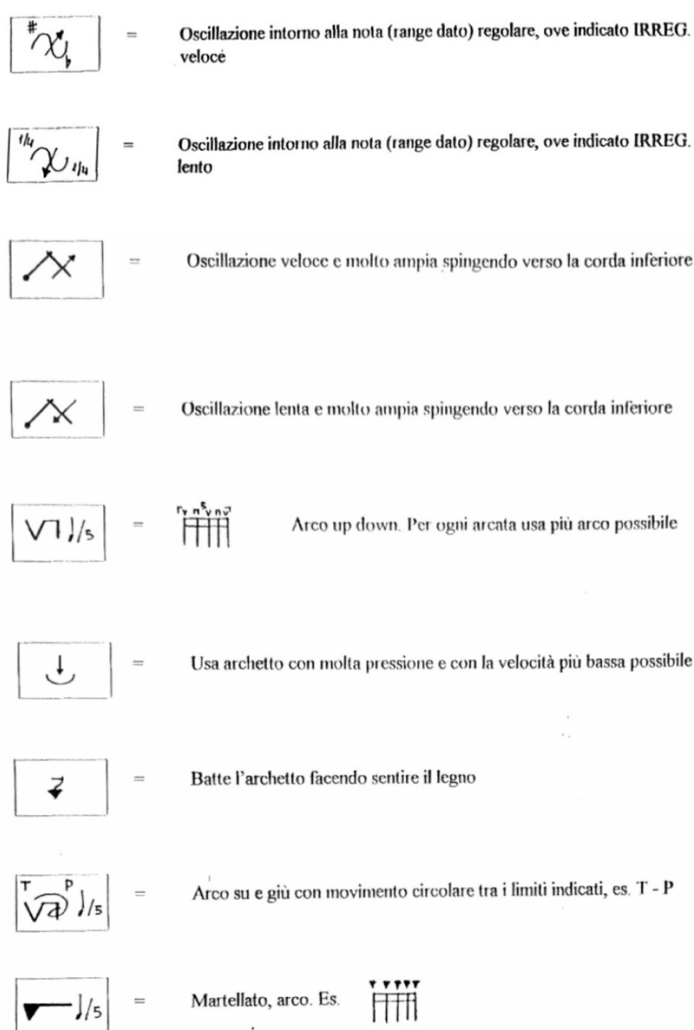


Fig. 3.1 LUPONE, Corda di metallo, estratto della legenda

Scorrendo la partitura, si evidenzia la convergenza di alcune gestualità in sincronia con gli interventi del nastro, come, ad esempio, alle bb. 4-9 [figg. 3.2a-b], il *glissando di timbro*, costituito dalla variazione di velocità, di pressione e di posizione

dell'arco sulla corda, quali posizione al ponte, ponte-centro, centro, centro-tastiera, tastiera. In questo caso, le posizioni dell'arco vengono interpolate con diverse velocità e associate ad altezze sensibili a tali variazioni.

Handwritten musical score for Vno I, Vno II, Vla, Vc, Tape, and Space. The score includes various musical notations, dynamics, and performance instructions. A vertical line at 32'' marks a significant point in the piece.

Score Details:

- Tempo:** $\text{♩} = 50$
- Measure Numbers:** 8, 32, 5, 10
- Vno I:** *IRREGOLARE* (32''), *P*
- Vno II:** *Pc*, *P*, *pp*, *P*
- Vla:** *C*, *f*, *VIBRATO MOLTO FINO A* (32''), *Pc*, *C*, *P*, *pp*
- Vc:** *Pc* (32''), *IRREGOLARE* (32''), *P*, *pp* *Grave*
- Tape:** *32''*, *pp*, *SEQ 1*
- Space:** *100% VLA*, *100% TUTTI*, *100% TUTTI*, *(A)*

corda di metallo

Fig. 3.2a

10 15 20 25 30 STOP TAPE

Vno I

Vno II

Vla

Vc

Tape

Eq

Rev

Dir

Space

Fig. 3.2b

Fig. 3.2b

Figg. 3.2a-b LUPONE, Corda di metallo, pag. 1-2. Primo intervento del nastro magnetico che inizia a b.3 della parte strumentale. A b. 4 inizia un glissando di timbro degli strumenti del quartetto. Si veda, ad esempio il violoncello.

In funzione di tale impronta timbrica, contrariamente a quanto parrebbe naturale, è interessante osservare come sia dallo studio scientifico dello strumento virtuale che il

compositore ha derivato alcune delle modalità e delle gestualità impiegate dagli strumenti acustici, attraverso un procedimento di organizzazione parametrica scaturito dalla formalizzazione del modello virtuale stesso: così il sistema arco/corda virtuale è adottato idealmente dal sistema arco/corda fisica. Le potenzialità offerte dalla sperimentazione del modello fisico hanno, così, consentito di acquisire nuove conoscenze sul sistema archetto-corda che in modo naturale sono state trasferite nel dominio del reale. Ne deriva, quindi, che le gestualità dello strumento acustico provengono, almeno in parte, dallo strumento virtuale, che a sua volta, però, si verifica e si perfeziona nel confronto/riscontro con lo strumento reale:

La fase di implementazione del modello si è conclusa dopo diverse sperimentazioni e verifiche comparative con gli strumenti ad arco reali (violino, viola e violoncello). Durante questa fase, i due ricercatori [Seno e Palumbo] hanno migliorato il rumore di sfregamento che è stato modellato aggiungendo alla funzione di eccitazione rumore bianco di semidisersione, pari, in ogni punto, al valore dell'accelerazione in quel punto: un espediente, questo, che ha permesso di rendere l'intensità del rumore proporzionale alla pressione dell'arco e di introdurre una componente aleatoria che, tramite l'archetto, è responsabile dei comportamenti micro-caotici della corda.⁴⁶

Alla luce di questo rapporto circolare costituitosi tra strumento virtuale e strumenti acustici, l'emergenza timbrica del metallo, che è comune ad entrambi, deriva, dunque, da un allineamento parametrico degli strumenti acustici con lo strumento virtuale e/o viceversa. Dagli esperimenti sul modello implementato, sono state scelte quelle funzioni di controllo algoritmico che più interessavano il compositore in relazione all'emergenza timbrica del metallo, applicandole ai seguenti parametri del modello fisico: I) tensione della corda (lunghezza); II) smorzamento interno; III) smorzamento dell'aria; IV) velocità dell'archetto; V) pressione dell'archetto; VI) posizione dell'archetto.

Riguardo gli attributi timbrici del metallo, ho utilizzato il modello privato della cassa armonica. Ho potuto esaminare la corda durante le variazioni del suo smorzamento interno che caratterizzano il materiale costruttivo; ho fissato le curve formantiche e ho sperimentato sugli strumenti reali, opportunamente filtrati dei contributi della cassa, le

⁴⁶ LUPONE, *Spazio, arco e metallo* cit., p. 85.

condizioni di altezza e di emissione del suono che avrebbero potuto garantirmi l'emergenza timbrica del metallo.⁴⁷

La composizione del glissando timbrico, ottenuto variando la pressione, la velocità e la posizione dell'arco nasce, dunque, dalle simulazioni dello strumento virtuale, così come altre articolazioni gestuali costruite dall'interpolazione di tali parametri, tra le quali un 'ritmo' di intensità (ottenuto variando la pressione dell'arco) e un 'ritmo' di timbro (ottenuto variando la velocità dell'arco) [fig. 3.3].

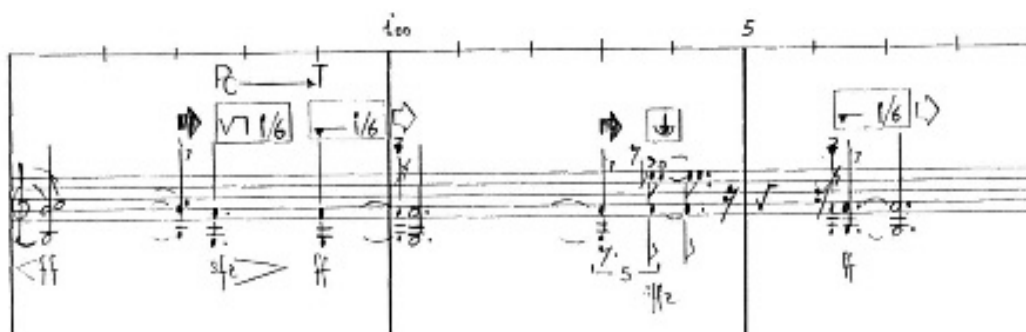


Fig. 3.3 LUPONE, Corda di metallo, pag. 59.

La ricostruzione delle diverse articolazioni gestuali è stata riassunta nel seguente schema, che evidenzia la differente derivazione delle gestualità utilizzate nella scrittura. Gli undici tipi di emissione sono a loro volta suddivisi in microfunzioni che rappresentano le caratteristiche della scrittura compositiva, distinguendo la derivazione dalla simulazione al calcolatore oppure dallo strumento reale [Fig 3.4].⁴⁸

⁴⁷ *Ivi*, p. 86.

⁴⁸ Tale schema implementa e sviluppa una schematizzazione operata dall'autore in *in ivi*, p. 89.

	MODALITÀ DI EMISSIONE DEL SUONO	MICROFUNZIONE ALL'INTERNO DELLA SCRITTURA COMPOSITIVA	DERIVAZIONE DALLA SIMULAZIONE DEL MODELLO FISICO	DERIVAZIONE DALLA SPERIMENTAZIONE SULLO STRUMENTO REALE
	GLISSANDO DI NOTA ottenuto tramite lo spostamento o l'oscillazione del dito della mano sinistra sulle note	spostamento fra due altezze diverse oscillazione intorno ad una altezza		rilascio della nota, effettuato alla fine della durata, in tempo brevissimo
	GLISSANDO DI CORDA ottenuto tramite lo spostamento della corda	deviazione ascendente dell' altezza		modulazione dell'armonico, come un vibrato
	GLISSANDO DI TIMBRO ottenuto con la variazione di pressione, di velocità e di posizione dell'archetto		variazione della pressione dell'arco su posizione o durante lo spostamento variazione della velocità dell'arco (ottenuta attraverso la relazione tra durata del suono ed espressione dinamica) spostamento dell'arco tra le 5 posizioni stabilite, su note fisse	spostamento dell'arco tra le 5 posizioni stabilite, su note fisse
	ALTEZZE PER 1/4 DI TONO	con funzione d'indeterminazione dell'altezza con funzione di movimento interno alla massa timbrica e al movimento interno degli unisoni con battimenti		
	SUONI CON SPETTRO E ALTEZZA INDETERMINATA ottenuti con posizione dell'arco forzata al tallone ed emissione di suoni in posizione armonica			l'arco genera un proprio nodo sulla corda che ha la funzione di bilanciare il nodo generato dal dito sulla posizione armonica sovrapposizione degli effetti di variazione dell'arco e dei glissandi su suoni armonici
	ARCO IN MOVIMENTO ALTERNATO-LEGATO	assume valenza timbrica		con funzione di iterazione omogenea del ritmo e cancellazione di figure preminenti
	ARCO MARTELLATO	assume valenza timbrica	con funzione di iterazione omogenea del ritmo e cancellazione di figure preminenti	
	ARCO SCIOLTO SU OGNI NOTA	ritmo degli attacchi		
	ARCO CON VARIAZIONE DI PRESSIONE		ritmo delle intensità	
	ARCO CON VARIAZIONE DI VELOCITÀ		ritmo del timbro	
	ARCO IN MOVIMENTO CIRCOLARE			introduce funzioni caotiche sul timbro e l'altezza. Quando sono presenti delle figure ritmiche anche su queste intervengono tali funzioni

Fig. 3.4 Schema dei gesti esecutivi, con le indicazioni dei simboli (ove possibile), delle modalità di emissione di suono, della 'microfunzione' all'interno della scrittura e le derivazioni dalla sperimentazione del modello fisico o dello strumento.

La circolarità del rapporto tra il lavoro dell'équipe e quello del compositore sottolinea quanto l'apporto scientifico sia entrato nella fase dell'ideazione. La costruzione di un nuovo algoritmo da parte di Palumbi e Seno ha fornito, infatti, gli strumenti più pertinenti per la realizzazione dell'idea iniziale, aprendo, così, a delle possibilità a cui il compositore stesso non aveva inizialmente pensato, né ipotizzato. L'uso non interdipendente dei parametri della velocità, della pressione e dell'altezza derivante dalla sperimentazione di materiali inediti ipotizzati dall'autore costituisce un significativo esempio di *physical thinking*, in cui il pensiero del compositore viene fecondato, e quindi ridefinito, dalla relazione con il modello fisico.

In tal senso, l'organizzazione parametrica ibrida – che accoglie sia elementi derivanti dalla ricerca sulla gestualità idiomatica degli strumenti del quartetto, sia elementi derivanti dalle sperimentazioni del modello fisico – rappresenta uno dei fondamentali elementi sintattici del brano, costituendo il collante che struttura tanto i materiali del nastro, quanto la scrittura degli strumenti acustici. Lo strumento virtuale si è costituito, dunque, come mezzo necessario e insostituibile del linguaggio per rispondere alle necessità espressive dell'autore.

Il nastro magnetico, realizzato con le sonorità prodotte dai modelli fisici, è composto da cinque brevi frammenti che – collocati all'interno di un discorso più articolato (l'intera esecuzione del brano dura all'incirca 18 minuti)⁴⁹ – ammontano, complessivamente, ad una durata di circa cinque minuti e mettono in evidenza le caratteristiche delle diverse sezioni dell'opera. Nella versione corrente della partitura, sono indicati solo l'inizio, la fine e la durata degli interventi del nastro, mentre i relativi dettagli della dinamica sono stati aggiunti a penna [Fig. 3.5].⁵⁰

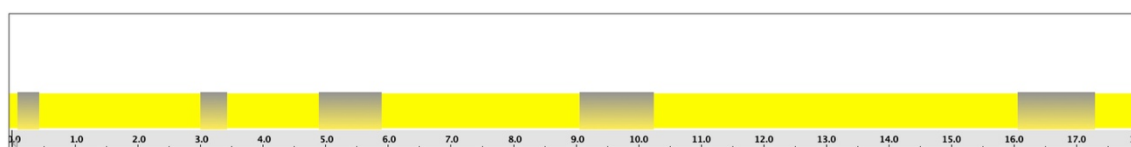


Fig. 3.5 Schema degli interventi del tape (in grigio) all'interno del brano: 0''- 0'42'; 3'05'- 3'44'; 4'54''- 5'51'; 9'10''- 10'25'; 16'06'- 17'25'.

⁴⁹ Nonostante le numerose esecuzioni di *Corda di Metallo*, la partitura non è ancora stata pubblicata e, anzi, dal dialogo instaurato con il compositore è emersa la volontà di una nuova revisione della stessa in funzione delle prossime esecuzioni.

⁵⁰ WALTER CIANCUSI, *Michelangelo Lupone: "Corda di metallo" (1997)*, in *International Computer Music Conference Proceedings*, Barcelona 2005, [4 pp.] p. [3].

Sonorità del nastro e sonorità strumentali, in stretta interazione, costituiscono i materiali per la costruzione di un «teatro dell'ascolto», per usare l'espressione coniata dall'autore stesso, in cui «la relazione tra gli elementi sonori genera l'intreccio, la loro collocazione e il movimento nello spazio, lo scenario»,⁵¹ quest'ultimo realizzato mediante elaborazioni digitali nel dominio del tempo e della frequenza di quattro riferimenti musicali primari: masse timbriche, cellule ritmiche, accordi, cellule tematiche. L'organizzazione dell'opera si articola in «quattro bacini di confluenza degli elementi musicali»,⁵² ciascuno dei quali predilige un parametro percettivo differente: riflessivo, con una prevalenza per il timbro; caotico, con la percezione spaziale; puntuale, con una percezione delle altezze e degli intervalli; logico, con il ritmo e le sue variazioni.

All'inizio del brano, ad esempio, l'attacco della viola viene seguito dal primo intervento del tape, grazie al quale la massa timbrica del quartetto prolifera in modo da rendere irriconoscibili gli strumenti, fino alla caotica polifonia con micro-variazioni del ritmo e delle altezze che caratterizzano il secondo bacino. La caoticità del procedere viene qui esperita mediante una continua variazione dei parametri esecutivi dello strumento, ed amplificata dai percorsi caotici delle sorgenti che si muovono su piani orizzontali, centrali e frontali, con direzione e velocità variate. Le zone di transizione tra i diversi bacini sono anch'esse caratterizzate da trasformazioni e interazioni dei diversi parametri percettivi, evidenziate dai percorsi dei quattro riferimenti musicali primari, che si muovono in diverse direzioni e a diverse velocità.

Il processo di spazializzazione, con sistema di otto altoparlanti, frutto, anch'esso, di un'intensa sperimentazione, si articola, infine, in quattro tipologie di intervento: sorgente localizzata; sorgente in avvicinamento e allontanamento; sorgente in elevazione; movimento caotico della sorgente, come sopradescritto. La sorgente in elevazione, in particolare, ha avuto un ruolo strategico poiché ha definito, all'interno del processo compositivo, «il range di altezze entro cui operano le masse timbriche, l'assetto del forte filtraggio passabanda posto sui segnali e la densità spettrale del nastro magnetico».⁵³

⁵¹ LUPONE, *Spazio, arco e metallo* cit., p. 81.

⁵² *Ivi*, p. 82.

⁵³ *Ivi*, p. 84.

Il brano, già alla fine degli anni Novanta, innova profondamente tanto le tecniche quanto le prospettive del linguaggio musicale, ambedue sperimentate in stretta simbiosi. Proprio da tale relazione scaturisce la fecondità espressivo-artistica della sintesi per modelli fisici che si pone esplicitamente su di un piano di ridefinizione del linguaggio musicale, in stretta correlazione dialogica con quest'ultimo. Così *Corda di metallo* è uno dei primi compiuti esempi di un pensare fisico destinato a rileggere in profondità gli orizzonti dell'agire compositivo del XX e del XXI secolo.

3.5.2 La Cyber action composition di Juraj Kojs

Poiché il modello fisico ingloba la rappresentazione di strumento e gesto, si configura quasi come un'evoluzione naturale il fatto che parte della produzione musicale si orienti ad indagare le potenzialità creative della gestualità. Proprio queste ultime possono essere considerate al centro della ricerca di Juraj Kojs, la cui musica è fondata sull'applicazione della gestualità all'esplorazione degli oggetti, degli strumenti musicali e delle azioni riferibili a fenomeni ambientali, che diventano il principale mezzo della sua espressione musicale: il compositore, rispetto ad indagare particolari parametri sonori, privilegia, infatti, le azioni performative, che costituiscono il centro del suo agire creativo, esplorandole e, al contempo, trasformandole.

Il substrato teorico da cui scaturisce la sua prospettiva è specificato, dall'autore stesso, nel suo articolo *The Language of Action and Cyberaction-based Music: Theory and Practice* nel quale cerca di leggere le peculiarità della 'musica basata sull'azione', in base al concetto di *affordance*, o un invito all'uso di un oggetto, già discusso nel paragrafo 3.3 del presente capitolo, che teorizza le modalità attraverso cui un ambiente o un oggetto si offrano al soggetto a cui può essere potenzialmente destinato. Ad esempio, l'interazione tra l'arco dell'esecutore e le corde dello strumento non solo favorisce l'emergenza del suono, ma indirizza anche la nostra comprensione dei mezzi e

dei modi di produrlo. In tal senso, il contatto tattile gioca un ruolo cruciale in queste relazioni, favorendo lo sviluppo di abilità proprie e stimolando l'espressività musicale.⁵⁴

A tal proposito, Kojs traccia la storia dei tipi di musica che sono esplicitamente basati sull'esplorazione delle *affordance* di uno strumento, di un oggetto o di una situazione attraverso l'azione:

Luigi Russolo, John Cage, Mauricio Kagel, Fluxus musicians, and Scratch Orchestra associates were among the first to develop graphical and verbal instructional choreographies which suggest musical actions. Concert music composers such as Luciano Berio, George Crumb, Helmut Lachenmann, György Ligeti, and Salvatore Sciarrino have also cultivated instructional languages which combine traditional notation with verbal and graphical directions. As opposed to the graphic notations that symbolize the type of sounds to be produced (e.g. in music of Earle Brown and Krzysztof Penderecki), the notations of these composers tend to suggest choreographies of movements to be performed.⁵⁵

La rappresentazione grafica delle azioni nella scrittura può rispecchiare, dunque, il movimento fisico dell'esecutore, incorporandone, in tal modo, il contatto con lo strumento nella notazione della musica basata sull'azione. Collegandosi idealmente a tale contesto, Kojs esplora le azioni nel dominio fisico per estrapolarne un vocabolario che fondi un linguaggio musicale dello spazio virtuale, accoppiando azioni fisiche e azioni simulate nel mondo digitale (§ 2.2.1, 2.2.1.11):

Can actions such as scraping the string then afford ground for musical exploration and creation of artistic context? Repeated string-scratching can indeed result in the generation of musical patterns. Repositioning the bow on the string and varying the pressure can inspire timbral explorations. Paired with other performative actions such as bowing on the bridge and the body of the instrument, scraping actions can yield a complex musical context. My work explores how these actions can be musically engaged in the digital domain. What kind of music making does coupling physical and digitally simulated actions suggest?⁵⁶

⁵⁴ JACK A. ADAMS, *A Closed-loop Theory of Motor Learning*, «Journal of Motor Behavior», III (1971), pp. 111-149; CHAFE, (1993), *Tactile Audio Feedback*, in *Proceedings of International Computer Music Conference*, Aarhus 1993, pp. 76-79.

⁵⁵ KOJS, *The Language of Action and Cyberaction-based Music* cit., p. 286.

⁵⁶ *Ivi*, p. 285.

Che i legami sintattici tra le varie azioni possano costruire il linguaggio espressivo della musica basata sulle azioni nel mondo fisico è testimoniato da Kojs attraverso una disamina accurata della lunga e articolata tradizione sviluppatasi in correlazione con le pratiche musicali che integrano tecniche strumentali estese e su cui la modellizzazione fisica può confluire innovandola e riscrivendola radicalmente. Guidate dalle sottigliezze del contatto tattile tra l'esecutore e lo strumento, le azioni possono risultare significativamente espressive, stimolando un'interazione compositiva multiforme:

We can group actions involving two rigid objects into the following categories: bouncing, bowing, hitting, plucking, rolling, rubbing, scraping, cutting, and shaving. Dripping and pouring suggest fluid bodies in action. Blowing means that air initiated the action. Shaking and stirring can combine liquids and solids. Such musical vocabularies have their own morphological characteristics, but they can all be considered part of one language: the language of action-based music.⁵⁷

La *cyber-action composition*, espressione coniata dallo stesso autore, costruisce, così, una sintassi che struttura ed organizza una serie di tecniche e di modalità esecutive che possono governare tutti i livelli dell'agire compositivo: azioni fisiche quali scuotere, colpire con percussori di metallo, legno e plastica (parti di mazzuolo e bastone), sfregare con l'archetto di violino e soffiare dentro una campana, ad esempio, costituiscono, nel loro insieme, la traiettoria formale di *At and Across* (2007), per campane slovacche e campane virtuali, che si basa totalmente sui principi della *action-based music* [fig. 3.6]. Nello specifico, tali azioni si esprimono sia nel dominio del tempo – dando vita a soluzioni ritmiche dinamiche, risultato della natura stessa dei gesti fisici –, sia nel dominio del timbro – di cui la morfologia spettrale tempo variante costituisce il principale parametro musicale –, sia nel dominio delle altezze spesso occultate all'interno rumore colorato derivato dalle azioni.

⁵⁷ KOJS, *The Language of Action and Cyberaction-based Music* cit., pp. 286-87.

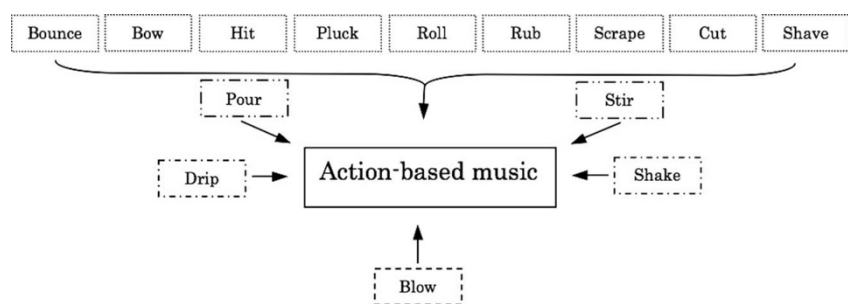


Fig. 3.6 *KoIs*, The Language of Action and Cyberaction-based Music, p. 288.

At and Across impegna un singolo esecutore – che produce azioni su un set di campane fisiche, tenendo gli strumenti in posizione verticale e orizzontale – e un computer che esegue strutture di campane virtuali generate ed eseguite in Genesis. Le campane, appese a un’asta orizzontale, permettono l’esecuzione controllata di più strumenti. Tali azioni individuali dominano sezioni particolari della composizione con la seguente disposizione: «intro, A, B, A', x', C, B', C', x'', B'', D, x'''», in which A = hitting, B = bowing, C = shaking e D = combined modes». ⁵⁸ L’esecutore tiene tutte le campane nelle sue mani, scuotendole durante l’introduzione. La figura 3.7 mostra la mappa delle azioni nel brano in cui è rappresentato l’accoppiamento delle azioni fisiche con le azioni cibernetiche, mediante il quale viene definito il piano formale della composizione.

Time	0—2'	2—3'30"	3—5'	4'—5'30"	5'15"—5'30"	5'30"—6'30"	6'30"—8'	8'—9'	8'30"—9'	9'—10'10"	10'10"—12'	11'—12'
Part	intro	A	B	A'	X'	C	B'	C'	X''	B''	D	X'''
Genesis		Hit single cyberbell	Bow	Hit cyberbell network	Poly-phony ¹	Hit multiple plate-like cyberbells	Bow, Blow cyberbell series	Hit single plate-like closed cyberbells	Poly-phony ²	Blow, Pluck cyberbells	'Cyberbell' multiple cyberplates and cyberbells	Polyphony ³
Performer	Shake	Hand held (HH) + outside beaters	HH + Bow top	HH + inside beaters		HH + shake	HH + bow + bottom	HH + muted shake		HH + bow all and blow	HH + shake + suspended polyphony with beaters	

Fig. 3.7 *KoIs*, The Language of Action and Cyberaction-based Music, p. 289.

⁵⁸ *Ivi*, p. 288. Le parti con la x minuscola indicano le sezioni più brevi di sola elettronica.

Kojs ha esplorato compositivamente una molteplicità di strumenti virtuali – in interazione con le azioni del mondo fisico, prima replicate, poi espanse, ibridate e sottoposte ad un meccanismo di astrazione dei principi fisici di produzione del suono –⁵⁹ comprendenti anche strumenti etnici e oggetti di uso quotidiano combinati per creare realtà sonore aumentate e impiegati estensivamente nelle sue opere,⁶⁰ come, fra le altre in *Garden of the Dragon* (§ 2.2.1), in cui tubi di cellophane e plastica ondulata amplificati sono stati usati per dare forma a un ecosistema musicale e *Revelations* (§ 2.2.11), per giocattoli circolari e piatti risonanti in cui vengono esplorate le sonorità di giocattoli fisici usati per controllare strumenti a percussioni virtuali.

Azioni musicali prodotte con oggetti quotidiani caratterizzano *Neither Stirred, Nor Shaken* (2007) per bicchieri da cocktail, shaker, frullatori ed elettronica, in cui vengono utilizzati dei sensori per mediare il contatto tra le azioni fisiche degli esecutori e le risposte degli strumenti virtuali attraverso la modellizzazione fisica. Bicchieri da cocktail, shaker di metallo e frullatori elettrici divengono strumenti musicali le cui azioni conseguenti quali mescolare, scuotere e frullare vengono tracciate dalla tecnologia dei sensori, i quali eccitano i modelli fisici di questi oggetti quotidiani creati per aumentare timbricamente le qualità sonore degli strumenti fisici. Una performance in tempo reale impegna tre percussionisti che azionano gli oggetti quotidiani e controllano quelli virtuali,⁶¹ producendo sonorità acute e percussive, mentre, in bicchieri da cocktail, mescolano liquidi e ghiaccio con cucchiaini di metallo, li agitano in shaker metallici e li mescolano in frullatori elettrici.

I gesti degli esecutori, che realizzano pattern ritmici semplici, costituiscono il meccanismo di eccitazione di circa 30 oggetti cibernetici, da cui deriva una notevole complessità ritmica. Se la percussività è direttamente legata all'azione esecutiva, il contenuto delle altezze dipende dalle frequenze di risonanza dei diversi contenitori. Data la semplicità degli strumenti, che producono timbri limitati, ma attraenti, è stato necessario aumentarne il potenziale espressivo, accoppiandoli con strumenti di sintesi di modellizzazione fisica come *shakers*, *engine rattles*, e *singing glasses*, portando alla

⁵⁹ Sulla topologia degli strumenti virtuali si veda la Tab. 2.1 del par. 2.2.

⁶⁰ Riguardo le composizioni con strumenti e azioni estese si veda: KOJS – SERAFIN, *Augmenting Sonic Reality. Cyberinstruments Designed with Digital Waveguides*, «Digital Creativity», XIX (2008), pp. 77-90: 81.

⁶¹ Cfr. KOJS – SERAFIN, *Stirring, Shaking, and Mixing: Musicalizing Everyday Actions*, in *Proceedings of the International Computer Music Conference*, Copenhagen 2007, pp. 37-40.

creazione di nuove *texture* e di timbri fisicamente aumentati. Gli oggetti quotidiani e le entità sonore simulate dal computer costituiscono, così, un terreno unico, di interazione compositiva in cui gli strumenti virtuali consentono l'estensione timbrica omogenea di oggetti, favorendo il costituirsi di un *continuum* tra sonorità fisiche familiari della quotidianità e suoni virtuali.

Il setup di ogni esecutore consiste in un bicchiere da cocktail, un cucchiaino e uno shaker di metallo, un frullatore elettrico, del ghiaccio, del liquido e dei sensori di temperatura, un accelerometro, che traccia l'accelerazione delle mani in movimento, e dei sensori piezoelettrici, che tracciano la variazione della pressione dell'aria che esce dai frullatori, in tempo reale, collegati tutti alla scheda *Make Controller* che ne acquisisce i dati.⁶²

Stirring, shaking, e mixing sono le tre azioni che suddividono in tre parti l'intera struttura del brano: nella sezione di apertura, il performer mette un bicchiere da cocktail con ghiaccio e liquido sulla custodia del CD che copre il sensore di temperatura, mescolandone il liquido; nella seconda sezione, i tre esecutori agitano i liquidi e il ghiaccio usando degli shaker di metallo; nella sezione finale, i performer usano tre frullatori elettrici. I dati risultanti dipendono dalla quantità di liquido e dal numero di cubetti di ghiaccio nei frullatori. I giocatori assaggiano le bevande preparate durante la performance e le dispongono secondo la loro qualità al 7' e uno degli esecutori li inserisce in una patch Max/MSP che li valuta e sceglie una delle tre potenziali conclusioni del solo dell'elettronica.⁶³ Le azioni analogiche vengono tutte tracciate e convertite in dati digitali in Max/MSP, attraverso un'interfaccia creata da Serafin. Gli strumenti fisici e quelli cibernetici sono accoppiati in base alle caratteristiche delle sezioni in cui vengono utilizzati, e i loro parametri sono mappati di conseguenza [fig. 3.8].

⁶² «I used a temperature sensor, accelerometer and piezo sensor to track in real-time some of the physical parameters of the cocktail-making. The temperature sensor is implanted in the used CD case serving as a glass stand which protects the sensor from dampness of the cocktail glass. The accelerometer is interlaced into the textile wrist-band. The performer wears the wrist-band on the palm of the hand with which he/she operates the shaker. The piezo sensor is taped to the engine exhaust outlet of the electric blender». Kois, *Cyberactions and Cyberinstruments via Physical Modeling Synthesis: Extending Musical Realities*, cit. p. 119-120.

⁶³ I dati dei sensori sono usati per controllare i *cybershaker*, i *cyberrattle* e i *cyberglasses* 'cantanti', tutti strumenti creati da Serafin mediante l'algoritmo PhISEM (i *cybershaker*, *cyberrattle*) e la sintesi per guida d'onda a bande (*cyberglasses*). cfr. *ivi*, p. 122.

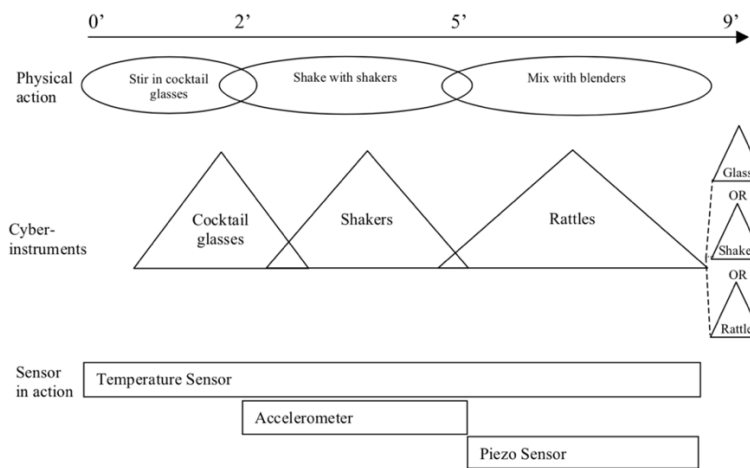


Fig. 3.8 Allineamento temporale tra azioni fisiche, strumenti informatici e tecnologie dei sensori in *Neither Stirred, Nor Shaken* (da Koj, *Cyberactions and Cyberinstruments via Physical Modeling Synthesis: Extending Musical Realities*, p. 123).

Neither Stirred, Nor Shaken evidenzia la generazione, la trasformazione e il trasporto di energia che si manifestano nell'agitazione, nello scuotimento e nella miscelazione che provocano la trasformazione del ghiaccio in liquido. Tale processo di fusione si riflette anche nell'evoluzione spettrale della composizione: gli spettri di frequenza imitano una forma simile ad un fiume con frequenze multiple che appaiono all'inizio del pezzo e convergono per creare una struttura di altezze meno densa, seppur dalla dinamica più intensa [figg. 3.9a-b-c].

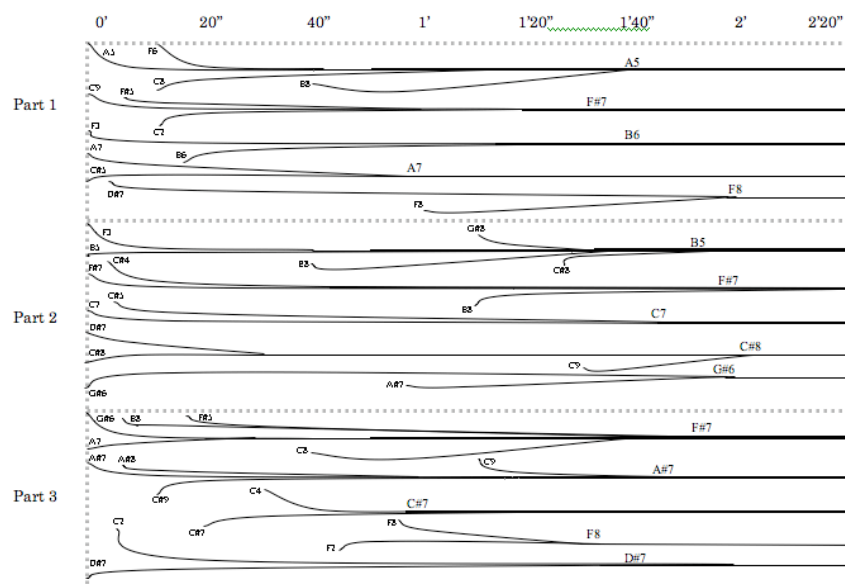


Fig. 3.9a

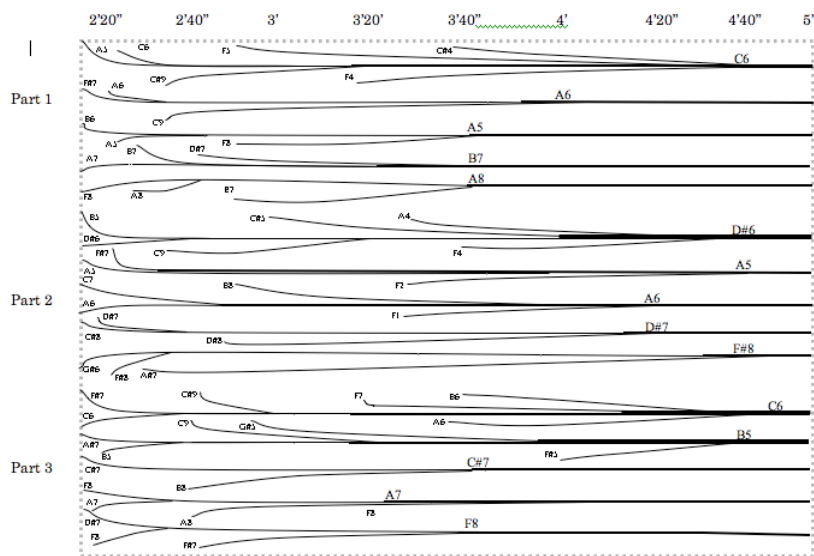


Fig. 3.9b

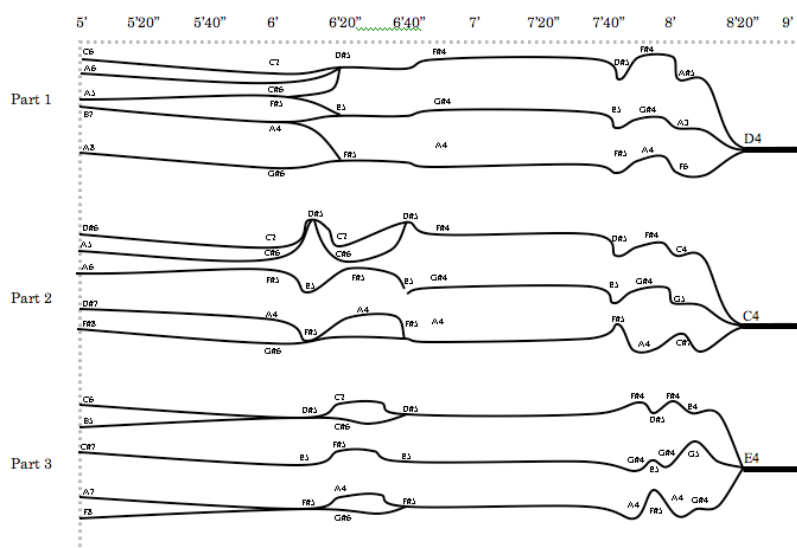


Fig. 3.9c

Fig. 3.9a-b-c La struttura complessiva delle altezze di Neither Stirred, Nor Shaken ha la forma di un fiume. L'asse orizzontale dei tre sistemi indica il tempo in incrementi di dieci secondi. Ognuno dei tre sistemi è diviso in tre parti che significano le frequenze degli oggetti virtuali allineati alla performance dei tre suonatori (da KOJS - SERAFIN, Stirring, Shaking, and Mixing: Musicalizing Everyday Actions, p. 38)

Le frequenze di risonanza dei *cyber-shaker*, dei sonagli e dei bicchieri sono derivate dagli spettri dei suoni dell'azione fisica, cosicché lo spettro generato dal computer imita e amplia nei registri lo spettro acustico. Le frequenze inerenti allo spettro fisico emergono nelle sonorità degli oggetti virtuali, spostate di registro, in modo fluente e indipendente dalla loro ampiezza. Durante il brano, le altezze multiple convergono in flussi più piccoli e infine in un flusso unico. Tale convergenza si riflette, inoltre, nel

continuo movimento dei registri, principalmente in discesa: mentre l'inizio della composizione presenta altezze nell'ottava C8, la sezione conclusiva mostra una migrazione verso l'area C4. La struttura spettrale definisce la struttura musicale del pezzo, anche se ogni nuova esecuzione del brano risulterà parzialmente diversa al variare delle condizioni, quali, ad esempio, la dimensione dei cubetti di ghiaccio, il materiale di cui è costituito lo shaker e il modello del frullatore.

Il processo di combinazione di azioni fisiche e cibernetiche suggerisce un *continuum* fluido di realtà fisiche e virtuali, che si sviluppa attraverso l' 'aumento' virtuale delle fonti fisiche che può sfociare nella progettazione anche di strutture astratte uniche, come pure di nuove procedure compositive. Gli strumenti virtuali espandono, così, lo spazio per l'azione musicale, partecipando alla creazione di strumenti ibridi analogico-digitali e fornendo uno spazio risonante per l'esecuzione sullo strumento fisico: se in *Neither Stirred Nor Shaken*, come si è visto, le azioni sono tracciate con tecnologie di sensori, in altri casi gli strumenti virtuali rispondono a gesti e segnali forniti dagli stessi strumenti fisici in tempo reale.

Esemplare di tale processo di ibridazione, è il brano *All Forgotten* (2006)⁶⁴ per pianoforte e coro di marimbe virtuali estese, che combina sonorità dello strumento fisico al limite dell'udibilità con le sonorità aumentate degli strumenti virtuali, che non richiedono, pertanto, uno specifico esecutore, o una specifica esecuzione da parte del pianista, poiché reagiscono alle articolazioni gestuali di quest'ultimo. Le informazioni di ampiezza del segnale delle corde del pianoforte, infatti, sono tracciate e utilizzate per controllare l'ensemble di *cyber-marimba* progettato con la sintesi modale e implementato in Max/MSP da Serafin, per l'applicazione in tempo reale.

L'esecutore, tenendo premuto il pedale di sostegno per tutto il brano, suona esclusivamente all'interno dello strumento. Essendo l'interazione martello-corda completamente eliminata, il contatto più stretto possibile delle dita dell'esecutore con lo strumento fa sì che azioni di 'arcata', di 'raschiatura' e di pizzicato scaturiscano dalla punta delle dita, intrise nella pece, che scorrono longitudinalmente sulle corde della cordiera. Le corde sono suddivise in regioni e le arcate sono eseguite come gruppi di

⁶⁴ Ultimo della silloge *Dark Night*, è ispirato all'ottavo verso del poema *Noche Oscura*, di Juan de la Cruz: «Quedéme y olvidéme, el rostro recliné sobre el Amado, cesó todo y dejéme, dejando mi cuidado entre las azucenas olvidado».

suoni con i palmi delle mani, oppure individualmente con la punta delle dita, come mostrato nella figura [fig. 3.10]. In tal modo, lo strumento produce un rumore colorato, accoppiato con i materiali concreti (la pece) modellizzati nell'elettronica, quasi a forzare la fisicità del pianoforte e della marimba virtuale, per portare alla luce le sonorità nascoste nella tensione della corda e nella massa della *cyber-bar*.

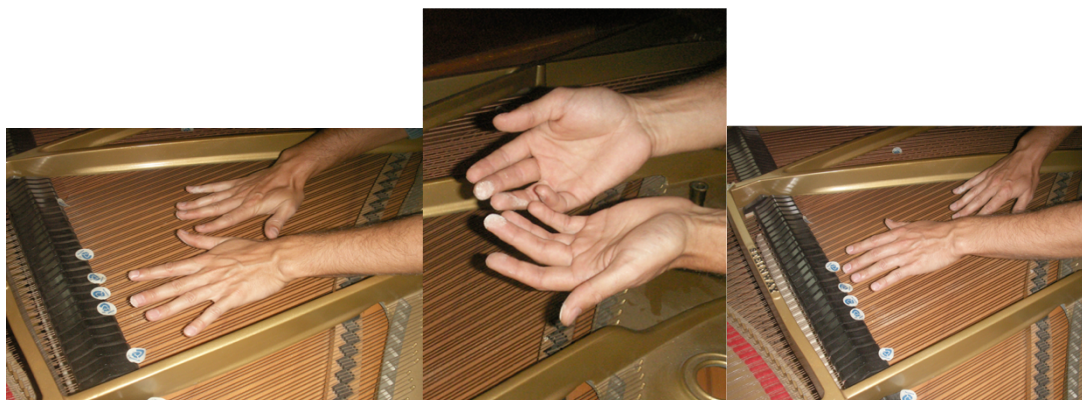


Fig. 3.10 Arcata con i palmi su regioni di corde, applicazione delle pece sulla punta delle dita, arcate sulle corde singole, in *All Forgotten* (da *Kois*, Virtual reality and sonic cyberspaces: augmentation, hybridisation and abstraction, pp. 170-171)

Sia le altezze del pianoforte sia quelle della *cyber-marimba* corrispondono alle note musicali estratte dai versi di un passo della *Noche Oscura* di Juan de la Cruz. Le lettere dell'alfabeto sono direttamente mappate sulle note musicali, sebbene i registri varino. Le altezze per la *cyber-marimba*, memorizzate in una *table look-up*, vengono rilette ciclicamente a varie velocità e trasposte in tutta la composizione. Così, mentre la trama del pianoforte discende di quattro ottave in quasi nove minuti, l'elettronica sale di registro oltre la gamma della tastiera dello strumento fisico. [fig. 3.11].

Computer:
Virtual
Marimbas

Pattern (E7 area) E8
 Pattern (E7 area) E8
 Pattern (E6 area) E7
 Pattern (E8 area)
 Pattern (E2, E4 areas)

Piano
Inside

Scrape with thumbnail(s). Create a continuous sound. Vary speed to create irregular motion.
f

Fig. 3.11 Divaricazione dei registri tra parte strumentale (dentro la cordiera del pianoforte) e *cyber-marimba* in *All Forgotten*

Espandendo le possibilità del pianoforte, le marimbe virtuali consentono:

- La produzione di suoni acuti e gravi non eseguibili sullo strumento fisico. Per es. il *drone tone* E2 iniziale, e le altezze E7-E12, a partire da p. 14 della partitura [fig. 3.12]:

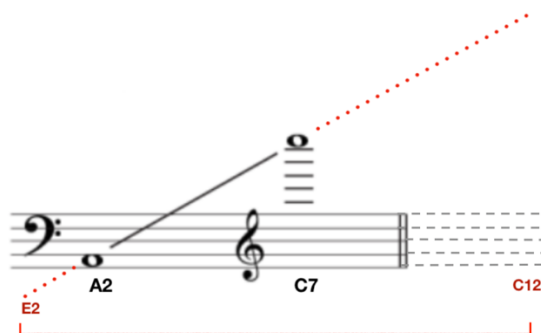


Fig. 3.12 Estensione delle altezze delle corde del pianoforte con la cyber-marimba marimba in All Forgotten

- L'eccitazione sostenuta di tali suoni [fig. 3.13]:

Computer:
Virtual
Marimbas

Piano
Inside

Drone tone (E2)

♩ = ca. 60

p

Sustain pedal should be depressed throughout the piece. Apply light resin on the third fingers on both hands.
Position the palms so that the third fingers are placed over the assigned strings.
Slide palms along the strings (not across, which would produce glissando). Produce noise. Allow harmonics to sound.
Direction of the flags suggests alteration between the right (up) and left (down) hands.

Fig. 3.13 Un estratto di partitura di All Forgotten

- La ripetizione veloce di suoni, altrimenti non realizzabile (un evento per un millisecondo), ad esempio da 5:52 in poi, [fig. 3.14]:

Computer:
Virtual
Marimbas

Piano
Inside

Clouds of attacks with increased density.

Drone tones

Scrape with nails. *sempre f*

Slide with palms.

Scrape with nails.

Slide with palms.

Fig. 3.14 Un estratto di partitura di All Forgotten

- Il cambiamento in tempo reale delle qualità del battente;
- Il riposizionamento estremamente rapido del battente sulla barra.

Tutte queste possibilità vengono ben esemplificate nel seguente estratto della partitura [fig. 3.15]:

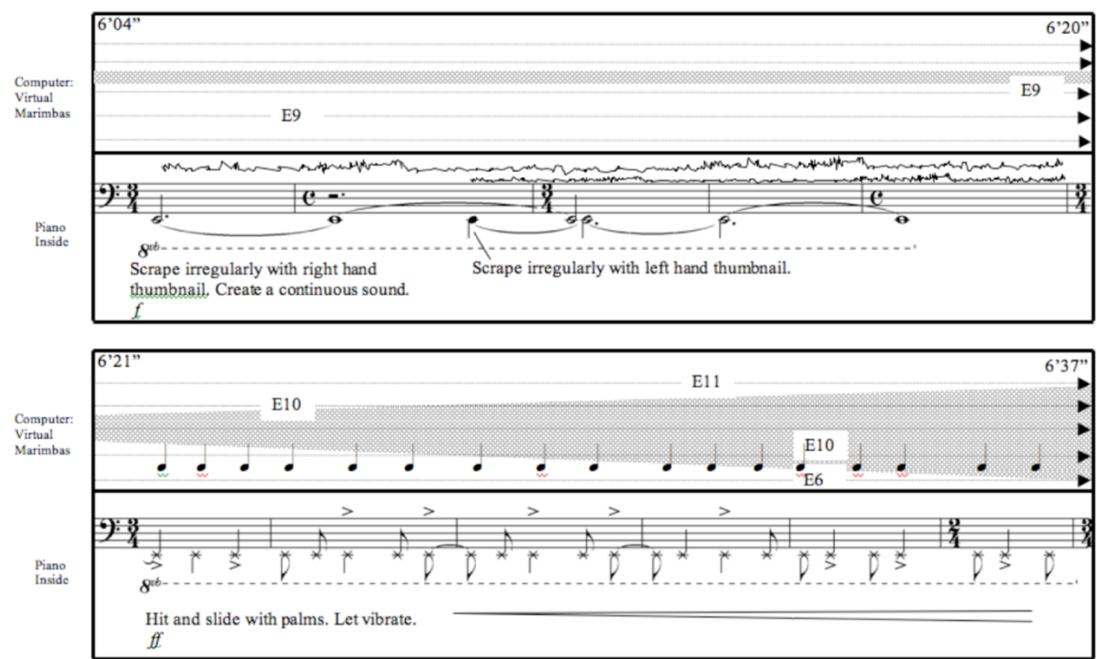


Fig. 3.15 Un estratto di partitura di All Forgotten, che descrive le azioni di scraping e tapping sulle corde del pianoforte. Le lettere “E” indicano regioni di altezze aumentate delle cyber-marimba.

In *All forgotten* il sistema strumento fisico-strumento virtuale che si costituisce nell’azione, consentendo l’esplorazione di nuove dimensioni timbriche e tessiturali, diviene il mezzo principale per strutturare l’intera arcata formale del brano: *scraping*, *tapping*, *sliding*, *hitting*... sono le azioni attraverso le quali leggere l’intera composizione [tab. 3.1].

A 0 – 32''	arcate dei palmi delle mani nella regione C3.
B 33'' - 3'04''	arcate dei palmi con accenti posizionati sui tempi forti come nel metro endecasillabico relativo ai quattro versi dell’ottava strofa
C 3'05''-3'37''	arcate dei palmi delle mani
B' 3'38''-5'14''	ripetizione di B, un’ottava più bassa e con accenti ritmici più condensati
C 5'36''-6'20''	raschiamento delle corde con le unghie

D 6'38"-8'40"	percussione con i palmi delle mani sulle corde smorzate o non smorzate, scendendo attraverso i registri delle corde del pianoforte
E 8'41"- 9'40"	pizzicando della corda A grave, seguito da un <i>tapping</i> di un motivo ritmico da cui si genera un pattern che si ripete fino alla fine.

Tab 3.1 Distribuzione, all'interno della forma, delle tecniche esecutive del performer nella cordiera del pianoforte

Ma le azioni condizionano pure la formulazione della partitura nelle sue peculiarità grafiche e prescrittive: laddove si esegue musica basata sull'azione, l'esecutore viene istruito sul *come* e sul *cosa* eseguire, piuttosto che su quale effetto sonoro ottenere. Se, infatti, una composizione basata sull'agire privilegia l'esplorazione dei gesti performativi, rispetto all'indagine su particolari parametri sonori, ne consegue che la partitura consiste in diagrammi, icone grafiche e istruzioni verbali che spiegano gli atti esecutivi. In tale contesto, non appare casuale che Kojis indaghi tale tipologia di notazione, la quale, in contrapposizione alla rappresentazione, si ricongiunge idealmente alle tradizionali tecniche di intavolatura:

Tablature systems, however, preserved the focus on the physicality of the music-making. Keyboard and string tablatures, for example, presented the musician with information about the placement of the fingers on particular strings or keys, rather than conveying the desired pitch or interval.⁶⁵

La coreografia grafica delle azioni nella notazione rispecchia, dunque, il movimento fisico dell'esecutore: il gesto grafico di un cerchio, per esempio, suggerirà il movimento circolare del braccio sullo strumento, come si può vedere nella figura 3.16, relativamente al brano *To Where He Waited* (2006) per violoncello ed elettronica, in cui il contatto dell'esecutore con lo strumento è incorporato nella notazione della *action-based music*, la quale fa anche ampio uso di tecniche estese.

⁶⁵ Kojis, *Notating Action-Based Music*, «Leonardo Music Journal», XXI (2011), pp. 65-72, p. 66.

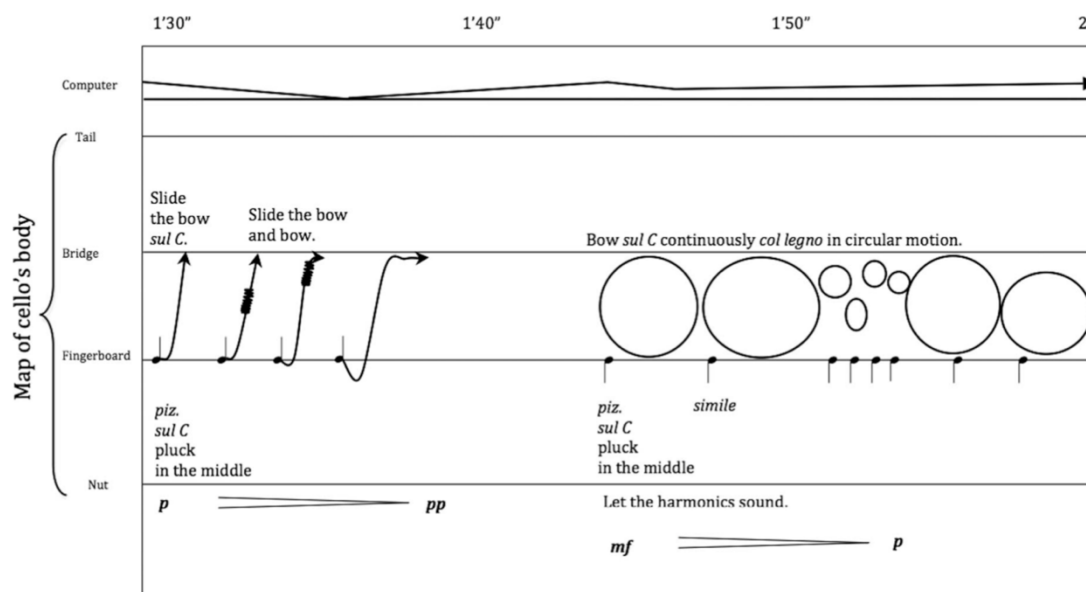


Fig. 3.16 Un estratto da *To Where He Waited*. Il gesto circolare grafico si traduce direttamente nell'azione fisica circolare eseguita con l'arco su punti specifici del corpo dello strumento (da Kols, *The Language of Action and Cyberaction-based Music*, p. 287).

Anche in *And All My Senses Suspended* (2007), per flauto, chitarra elettrica, contrabbasso e pianoforte, i gesti degli strumenti sono rappresentati graficamente, includendo pure materiali melodici concreti che l'intero ensemble sussurra nella sezione finale della composizione. Il brano introduce un approccio più flessibile alla dimensione ritmica del materiale impiegato, la cui durata dipende dalla durata della pagina in cui sono collocati: la partitura usa, infatti, una lunghezza della pagina variabile che oscilla tra 10, 15, 20, 25 e 40 secondi, con incremento di durata verso la fine della composizione [fig. 3.17].

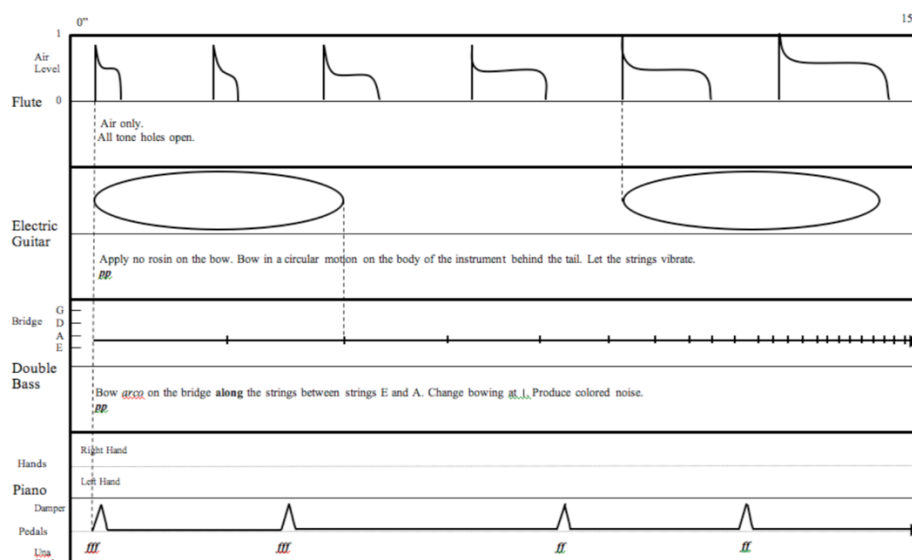


Fig. 3.17 Un estratto da Una Noche Oscura. Le azioni sono 'incarnate' nella partitura: Il controllo degli strumenti da parte degli esecutori è 'coreografato' (da Kois, *Cyberactions and Cyberinstruments via Physical Modeling Synthesis: Extending Musical Realities*, p. 113).

Three Movements (2004), per pianoforte non preparato ed elettronica, esplora la creazione di nuovi strumenti, utilizzando le componenti dello strumento, quali la cassa, le corde e la meccanica della tastiera, come nuovi strumenti musicali indipendenti derivati dal processo di separazione delle componenti acustiche del pianoforte,⁶⁶ che vengono impiegati con predominanza variabile nei diversi movimenti del brano: azioni applicate al corpo risonante del pianoforte animano la prima parte (*Palms on the Strings*); azioni di scivolamento e di pressione sui tasti che non producono alcuna altezza concreta danno luogo a un insieme di sonorità percussive posizionate sulla soglia dell'udito nella seconda parte (*Sliding Quietly*), mentre una performance convenzionale in modalità regolare su una tastiera muta costituisce l'azione primaria nella terza parte (*Bowed Fingertips*).

In *Palms on the Strings*, la *cyber-string*, che genera uno strato timbrico supplementare, funge anche da strumento derivato dalla separazione.⁶⁷ Da un punto di

⁶⁶ «The piece also investigates the expressive properties of the friction bowed cyberstring as modeled in exciting the string with the acoustic piano while highlighting the acoustics of its own sound production». Kois, *Cyberactions and Cyberinstruments via Physical Modeling Synthesis*, cit. p. 113.

⁶⁷ «In the opening movement, the piano case is defined as a percussion instrument. The performer uses its frame, soundboard, metal dividers and strings in a variety of performance actions such as dynamically varied rubbing, tapping and hitting with the palms and fingers. Keeping the sustain pedal down throughout the movement allows the slightest excitation to enliven the case. The most satisfying sonorities occur at these miniscule excitations, and a microphone is positioned inside the case to amplify

vista strettamente funzionale, la *cyber-string* è impiegata per generare uno sfondo per le sonorità in evoluzione del pianoforte. La partitura è strutturata in due pentagrammi che incorporano sia l'elettronica (in alto) che il pianoforte (in basso) [fig. 3.18]. La scansione verticale misura il tempo in secondi, quella orizzontale, relativa alla parte elettronica, indica la fluttuazione dell'ampiezza (centrata intorno alla linea invisibile 0 al centro del sistema) dei modelli di archi preregistrati (forma d'onda rossa densa), del pianoforte campionato (linea verde) e degli spunti ritmici (modello e linea rosa).

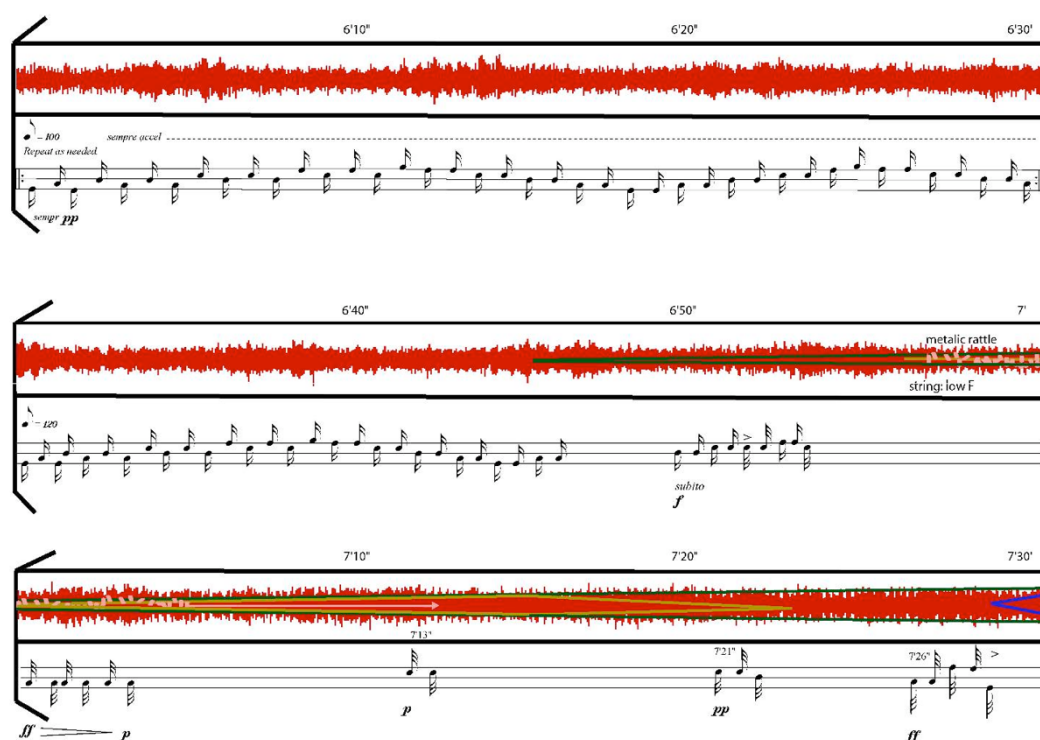


Fig. 3.18 Estratto di *Palms on the Strings*. La parte del pianoforte è segnata in tre linee e tre spazi. Questi rappresentano le regioni di esecuzione all'interno della cassa: tre divisori di metallo (spazi) e aree di archi posizionate tra di essi (linee) (da Koss, *Cyberactions and Cyberinstruments via Physical Modeling Synthesis: Extending Musical Realities*, p. 78).

In *Sliding Quietly*, la tastiera si caratterizza come uno strumento acustico autonomo, derivato dalla sua separazione dal pianoforte. L'interprete lo esegue facendo scorrere le unghie, le nocche e i palmi delle mani sopra i tasti senza premerli completamente in modo da non produrre un'altezza definita, bensì una serie di sonorità

the sounds and transfer them to Max/MSP, where an artificial resonator is created out of a bank of delays. Adding this resonating quality completes the case as a stand-alone instrument. The case also functions as a controller. When the metal dividers are stuck, the signal is processed by a series of comb filters. This results in a sound resembling a pulsating didgeridoo. This establishes a clear sense of the case being the excitation mechanism resonating in virtual computer». Ivi, p. 76-77.

percussive leggermente acute, la cui frequenza risulta essere proporzionale alla velocità del gesto di glissando eseguito, e la cui gamma costituisce la natura espressiva dello strumento. Le azioni *in glissando* della mano funzionano anche come meccanismo di eccitazione per l'arco virtuale. Due microfoni posizionati sopra ogni estremità della tastiera trasmettono il segnale a Max/MSP, che lo analizza e lo amplifica in modo da eccitare la cyber-corda con l'arco, che segue uno spettro di frequenze preassegnato e corrisponde al disegno complessivo del pitch della composizione. La figura 3.19 esemplifica il momento in cui la corda pizzicata (la forma d'onda viola al centro), i campionatori del pianoforte (linea verde), lo sfregamento della corda (la linea gialla) e la performance del pianoforte (il sistema in basso) si allineano a comporre la partitura. Le linee rette che collegano i punti iniziali e finali del gesto rappresentano le azioni in *glissando*.

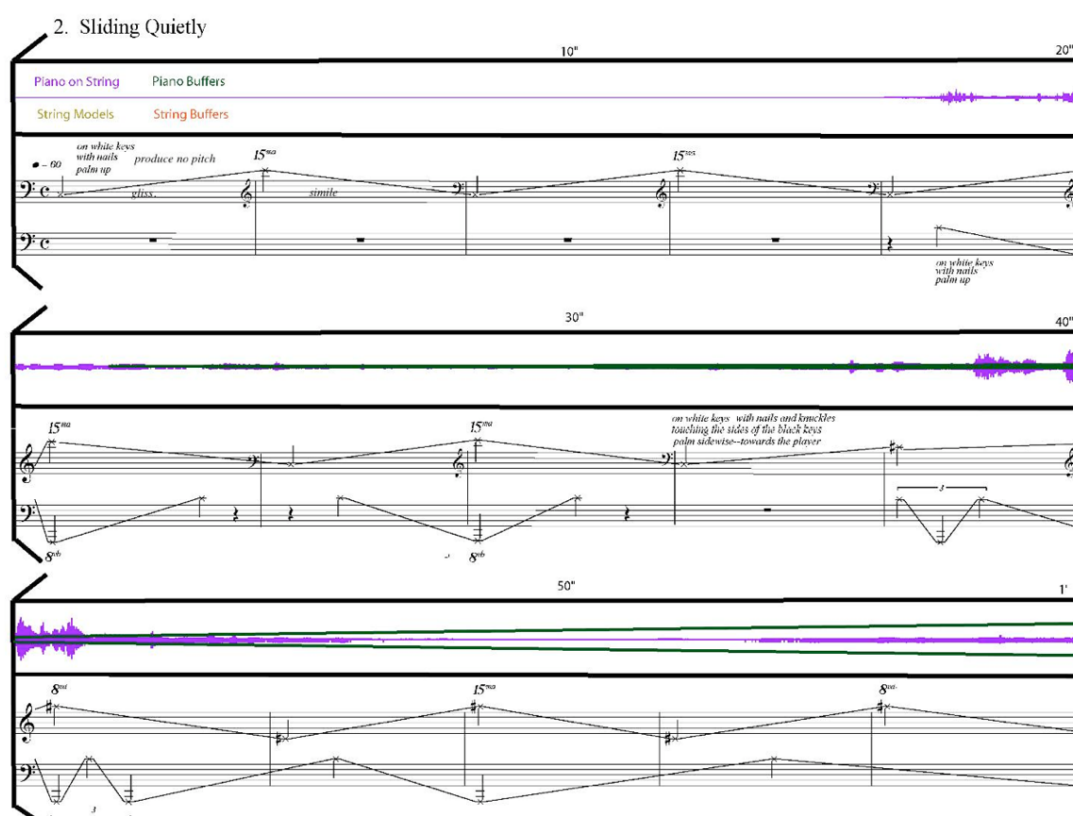


Fig. 3.19 Un estratto della partitura di *Sliding Quietly*. La notazione tradizionale è usata per suggerire azioni come lo scivolare sulla tastiera muted (da Kols, *Cyberactions and Cyberinstruments via Physical Modeling Synthesis: Extending Musical Realities*, p. 80).

Così, partiture di tale natura possono delucidare la direzione, la pressione e la velocità di movimento delle interazioni tattili dell'esecutore con lo strumento, fino ad arrivare a mappare, in dettaglio, il braccio dell'esecutore stesso. Un esempio tratto dal

E-clip-sing (§ 2.2.1.11), per clarinetto, chitarra, violoncello, contrabbasso ed elettronica, mostra come l'esecutore abbia rapidamente accesso alla musica, attraverso una partitura che specifica il tipo e la posizione delle azioni insieme alla esplicita rappresentazione grafica delle azioni medesime, in cui vengono pure incorporate qualità, articolazione, direzione e durata [fig. 3.20].⁶⁸

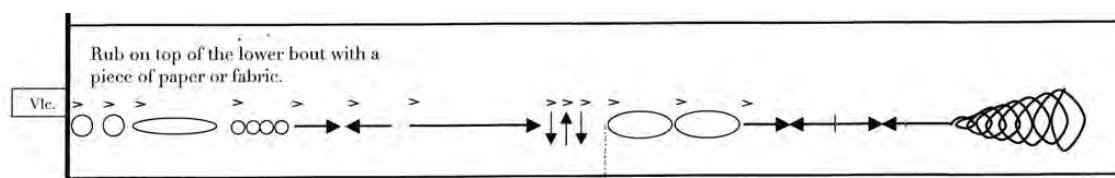


Fig. 3.20 Un estratto da *E-clip-sing* per clarinetto, chitarra, violoncello, contrabbasso ed elettronica, 2008.
(da Kols, *Notation Action based music*, p.66)

Il corpo umano, attraverso la rappresentazione grafica dei suoi arti, entra direttamente nella partitura scandendo in modo particolarmente efficace e suggestivo la notazione delle azioni. Grafici con 'mani' impegnate in azioni – ritratte sia nella loro configurazione fisica, sia nella loro trasfigurazione astratta – caratterizzano l'intera partitura di *At and Across* [fig. 3.21].

⁶⁸ Cfr. Kols, *Notating Action-Based Music* cit., p. 66.

Time	8'	8'06"	8'08"	8'11.25"	8'15"
Electronics	Hit four single plate-like cyberbells: A3, A3+, E#4+, F#4. Pluck six single cyberbells: A3, A3+, F#4, F#4+, E5, A#4.				
Performer	Blow cyberbell network. Both hands: Full mute. Rotate wrist. Right Hand: Full mute. Rotate wrist. Rub the bell lightly against the left hand. Hold the bell in both hands completely muted. Shake front and back as a cup of darts.				

Fig. 3.21 Estratto da *Kojs, At and Across*, p. 46.

Mentre la notazione convenzionale mostra quali campane accordate usare – le cui strutture armoniche e dinamiche rispecchiano e accentuano le relazioni spettrali tra le parziali delle campane a sintesi additiva di Risset⁶⁹ –, la grafica delle mani fornisce istruzioni sulle modalità di eccitazione delle campane, specificata in legenda [fig. 3.22], come pure specificate in legenda sono il dettaglio delle azioni eseguite sulle campane virtuali [fig. 3.23a-b] – quali soffiare, colpire e pizzicare, definite grazie alla visualizzazione dell'ambiente Genesis – che compaiono come grafici di riferimento nella partitura, rappresentando, nel contesto di una dimensione di totale fluidità garantita dal formalismo Cordis-Anima, tutte le infinite possibilità offerte dal virtuale.⁷⁰

⁶⁹ «Harmonic and dynamic structures mirror and accentuate the spectral relationships between the eleven partials of J.C. Risset's additive synthesis bells». *Kojs, At and Across*, 2007, p. 2. Le altezze specificate nella partitura sono le seguenti: A3, A3+, F#4+ F#4, A#4, E5, G5, C6, D6, F#6 & G6 (nel sistema utilizzato il A3 corrisponde al La2).

⁷⁰ Si veda il par. 2.4.2 *Cyberbell in Genesis* del secondo capitolo.

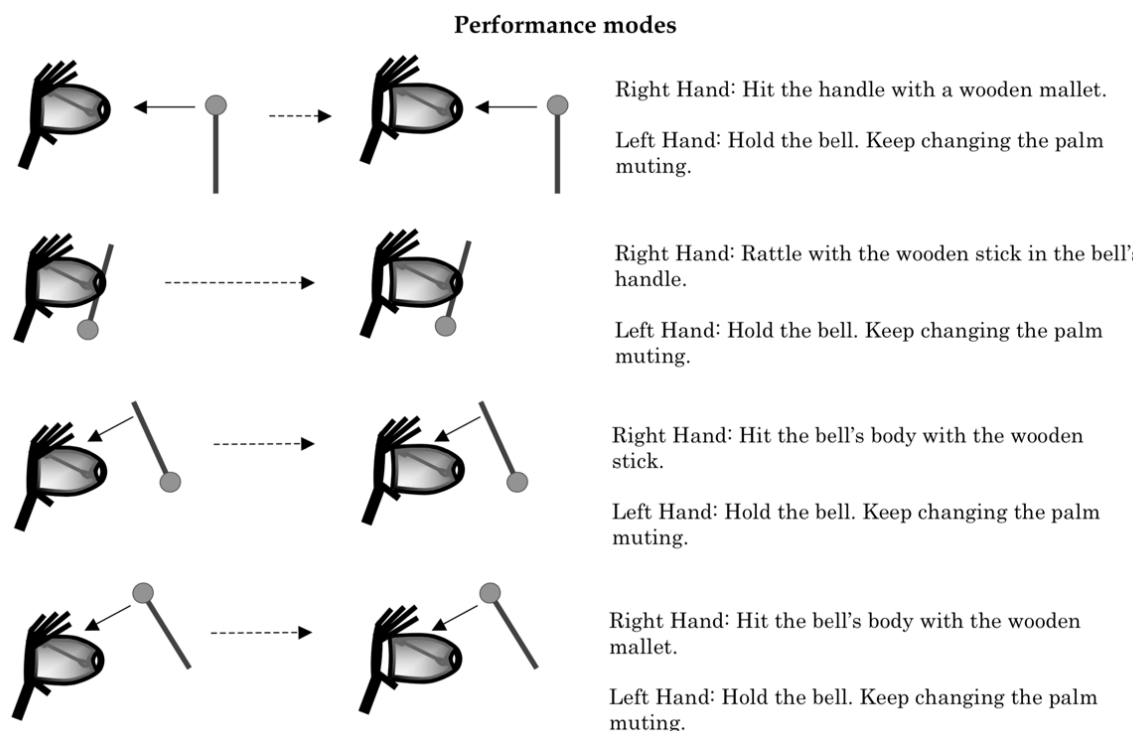


Fig. 3.22 Estratto dalla legenda: specificazione delle modalità delle azioni per eseguire le campane
 (da Kois, At and Across, p. 6).

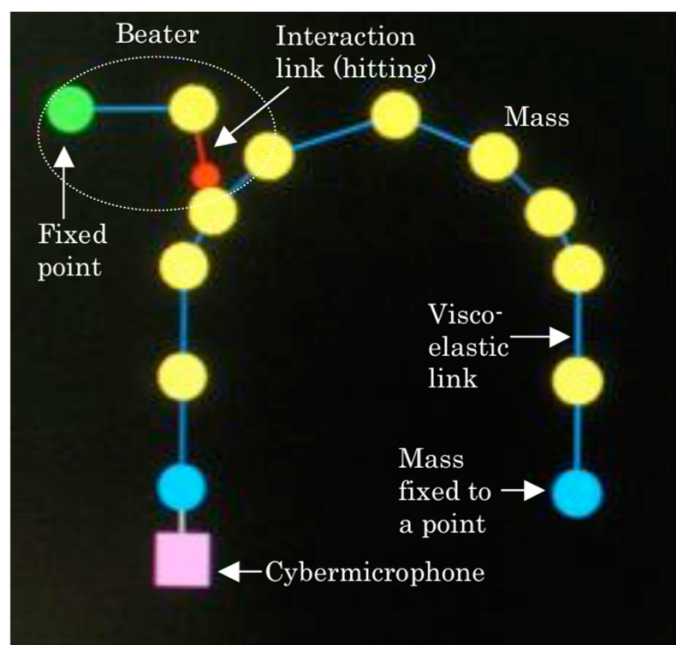
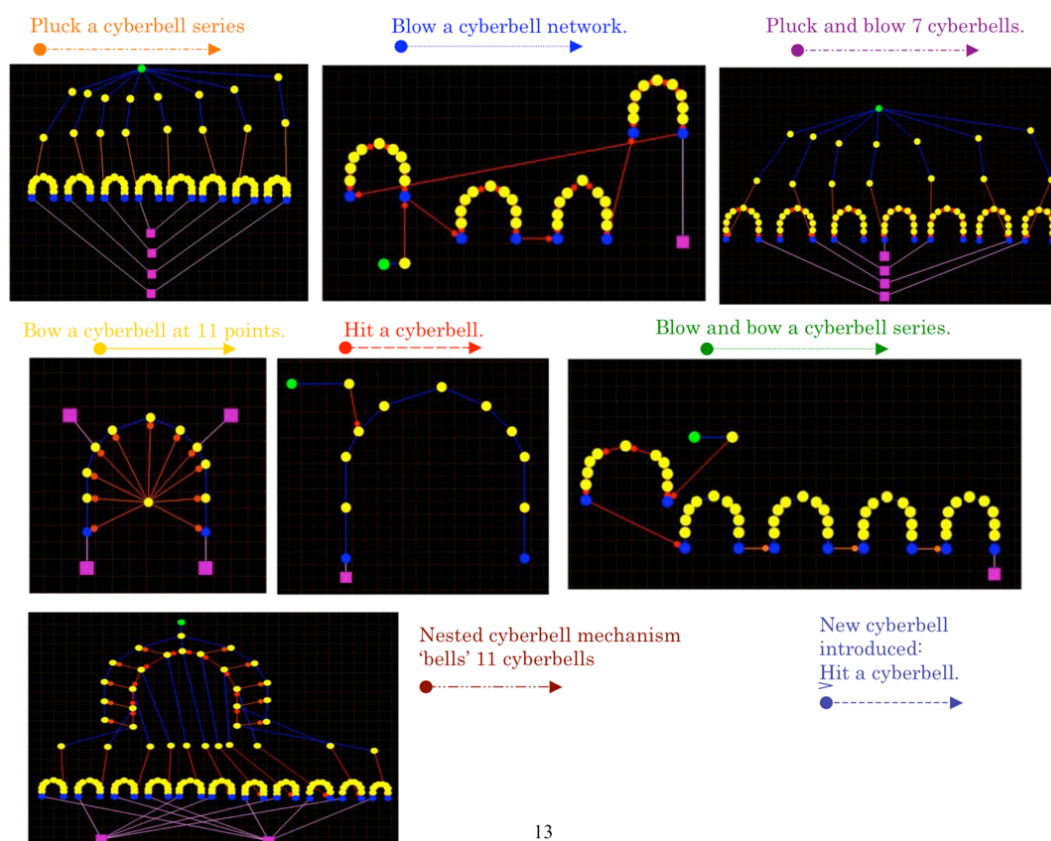


Fig. 3.23a Estratto dalla legenda di At and Across: Cyber-bell di base costruita con 11 masse (punti gialli) collegate con i link di smorzamento-rigidità (linee blu). I punti blu sono masse messe a terra in un punto fisso. Il quadrato rosa rappresenta un modulo cyber-microphone che permette di sentire lo strumento. Il beater consiste in un punto fisso (il punto verde) collegato a una massa. In questo caso, il collegamento rosso e i suoi parametri significano colpire
 (da Kois, At and Across, p. 12).



13

Fig. 3.23b Estratto dalla legenda: specificazione delle modalità delle azioni delle cyber-bell
(da Kois, *At and Across*, p.13)

Le notazioni basate sull'azione, discusse in precedenza, rivelano il funzionamento interno della musica spostandone il focus sulla meccanica reale della produzione del suono, cercando di specificare e di rendere intelligibili le interazioni tra gli strumenti e la ricchezza delle possibilità espressive che ne derivano:

Putting it another way, we should always remember that the notation of music is preceded by the creation of music, just as thought and speech came before written language. Mapping the sonic data, whether prescriptively or descriptively, to visual representation, in the end requires an already-formed mental image about how the music works. In action-based music, music is treated as a physical process, engaging our bodies and objects in actions. Experiencing music enactively—that is creating, notating and performing it through such lens and ear—enriches our musical imagination and connects it to our everyday world.⁷¹

⁷¹ Kois, *Notating Action-Based Music* cit., p. 71.

La definizione di Kojève di «musica basata sull'azione» postula, così, un tipo di musica in cui la consapevolezza della fonte di produzione del suono, o la consapevolezza degli aspetti percettivi e fenomenologici del suono, è essenziale, poiché il costante richiamo alla dimensione dell'agire è il mezzo scelto dal compositore per inglobare l'umano nel virtuale: è, infatti, mediante l' 'umanizzazione' del virtuale compiuta mediante l'azione che il suono, pur nella sua astratta alterità, può continuare a mantenere un legame archetipico con una dimensione primordiale della sonorità strettamente legata alla quotidianità dell'esistenza, che è al contempo riconoscimento di un nesso percettivo pre-culturale nascosto, nella meccanica stessa di produzione del suono, del suo essere moto, che si espande nello spazio, senza aggettivi.

3.5.3 Tra formalizzazione e imprevedibilità: Mauro Lanza e la poetica del 'side effect'

Fin dalla fine degli anni Novanta, il compositore italiano Mauro Lanza ha messo al centro della sua poetica la necessità di sperimentare nuovi strumenti, indagandone natura e potenzialità espressive: «une appréhension expérimentale du matériel sonore et des «organes» qui le produisent a ainsi orienté mon travail: apprendre à jouer des nouveaux instruments tout en s'inspirant des limitations qui nous sont imposées par leur morphologie». ⁷² Tale interesse morfologico ha spinto il compositore a cercare un approccio quasi verginale, volutamente avulso dal sistema di norme linguistiche consueto, utilizzando, innanzitutto, oggetti/strumenti che si costituivano come un riflesso deformato degli strumenti musicali della tradizione, fino a sondare le potenzialità degli strumenti virtuali creati mediante le tecniche di modellizzazione fisica. Risulta perciò necessario ricostruire il percorso seguito da Lanza il quale in un primo momento, pur rimanendo nell'ambito acustico, utilizza strumenti del tutto avulsi dalla tradizione classica per poi iniziare la sperimentazione sugli strumenti virtuali. Questo processo, all'interno della sua poetica può leggersi come la duplice faccia di una medesima medaglia, una duplice faccia che si relaziona e si illumina reciprocamente.

⁷² MAURO LANZA, *Programma di sala*, <https://medias.ircam.fr/media/old_archives/programnote/LO38017-01-wm.pdf> (accesso 7-11-2021).

In *Barocco* (1998-2003) – primo brano del ciclo *Nessun suono d'acqua*,⁷³ su testi di Amelia Rosselli⁷⁴ – pur ancora lontano, infatti, dall'utilizzare strumenti virtuali, il compositore impiega, insieme alla voce e ad una viola, una serie di strumenti giocattolo – chitarra Bontempi, piccole *cow-box*, giocattoli per cani di latex con fischietto ...–,⁷⁵ dalle limitate possibilità, che lo spingono a pensare a modalità esecutive del tutto inconsuete, le quali emergono in virtù dei vincoli assai più stringenti presupposti da tali strumenti rispetto ai loro corrispondenti della tradizione classica: gli strumenti giocattolo, ad esempio, possono produrre, solitamente, al massimo le sette note della scala di Do magg. – e pure con un'intonazione assai approssimativa –, con circoscritte possibilità di articolazione e di dinamica. Si tratta, dunque, di oggetti sonori, scelti proprio per la fragilità e la limitatezza della loro fattura, «troppo caratterizzati nella loro singolarità per mettere in valore un'eventuale struttura musicale che li unifichi»,⁷⁶ per parafrasare le parole di Boulez, cui l'autore stesso si rifà.

Nell'usare tali strumenti i parametri di altezza e durata, ad esempio, non possono essere considerati come rigidamente separati: «On ne peut pas à la fois jouer une note et jouer piano, car en jouant plus fort, la note sera différente. C'est ce que j'appelle une pensée à objets sonores, sans dissociation possible»⁷⁷. Tali carenze – ben lungi dal rappresentare una *deminutio* delle possibilità linguistico-espressive – costringono l'autore a concentrarsi, ancor di più, su «problématiques suivantes qui [...] constituent

⁷³ Il ciclo è costituito da *Barocco*, *Erba nera che cresci segno nero tu vivi* (1999-2001), *Mare* (2003-2004) e *Vesperbild* (2006-7). I primi tre sono brani vocali, su testi di Amelia Rosselli, mentre l'ultimo è strumentale. In realtà a completamento del ciclo, l'autore avrebbe previsto un quinto brano, non ancora composto. *Comunicazione personale dell'autore* (21-11-2021).

⁷⁴ «Barocco bello tutt'impigliato bianca ginestra con la solita Maria blu sul liquido cero nudo scandalosamente il Cristo attraente alle bambine. Cristo Gesù che non marcisci con lo cuore spinoso. Mare, ti hanno proclamato. Sei una grande bestia lumaca. Hai la sordità del fondo tufo. Mare mare hai la gioia e la misericordia con te. Sei un fiore trasparente una forte tomba. Erba nera che cresci segno nero tu vivi».

AMELIA ROSSELLI, *Prime prose italiane* (1954),

in <https://medias.ircam.fr/media/old_archives/programnote/LO38017-01-wm.pdf> (accesso 7-11-2021).

⁷⁵ *Barocco* è scritto per una piccola orchestra così composta: strumenti a fiato – tromba, sassofono, clarinetto Bontempi e corno –, metalli – due pianoforti giocattolo, un glockenspiel Bontempi e due crotali –, una sezione 'melodica' – voce, viola, chitarra giocattolo Bontempi – e, infine, tre piccole *cow-box* (che ruggiscono) e dieci bambole squalo con fischietto (che stridono).

⁷⁶ TOMMASO GORELLI, *Intervista a Mauro Lanza e Andrea Valle per la prima italiana di Regnum* (06-07-2015), in <<https://www.thenewnoise.it/i-regnum-di-andrea-valle-e-mauro-lanza/>> (accesso 7-11-2021).

⁷⁷ CHARLOTTE IMBAULT, *Intervista a Mauro Lanza* (16-10-2009), in <<https://www.lintermede.com/portrait-mauro-lanza.php>> (accesso 7-11-2021).

l'échine de la composition musicale: la gestion du temps, la forme et le rythme»,⁷⁸ sollecitandolo a concepire delle strategie compensative, che evitino, ad esempio, la monotonia scaturita da un impiego di note particolarmente ridotto, per mezzo di una studiata utilizzazione economica delle note stesse, le quali vengono usate con parsimonia durante l'intero sviluppo temporale del brano:

Travailler avec si peu de moyens réduit les possibilités combinatoires, et la liaison étroite existant entre tous les paramètres du son de ces instruments (sur les anches, par exemple, jouer « fort » signifie aussi jouer « bas ») exclut la possibilité de les utiliser indépendamment. L'organisation procède dès lors de la gestion des vides et des pleins, des accélérations et des décélérations, ou bien du jeu des répétitions.⁷⁹

Tali strategie compositive si rivelano essere in piena sintonia con le sperimentazioni linguistiche di un testo, quale quello di Amelia Rosselli utilizzato in *Barocco*, nel quale si impiega un italiano infantile e volutamente basilare scaturito dalla reinterpretazione linguistico-poetica del vissuto personale dell'autrice: poiché fino a quel momento aveva trascorso la quasi totalità della propria esistenza all'estero, sperimenta una lingua parzialmente nuova utilizzata, anch'essa, come un giocattolo in mano a delle bambine. In ideale convergenza con l'estetica del testo prescelto, la scelta del compositore assume, dunque, un significato organico, da cui consegue un discorso musicale strutturato sulle limitazioni imposte da tali strumenti, che vengono agite come vere e proprie regole del gioco.

In questo senso l'utilizzazione creativa di tale tipologia di strumenti, o sperimentazioni vocali, sembra preparare il terreno per un ulteriore passo verso l'alterità: quello costituito da una diversa forma di 'eterodossia', funzionalmente legata alla prima, che viene sperimentata a partire da *Erba nera che cresci segno nero tu vivi*, per voce ed elettronica, in cui la voce si accompagna ad una sorta di orchestra gamelan virtuale, i cui suoni sono il risultato di una sintesi per modelli fisici scaturita dalla sperimentazione del software Modalys, il quale ha offerto la possibilità al compositore di continuare a lavorare con strumenti *nuovi* dagli inattesi risultati sonori. Se, in quegli anni tale software non permetteva ancora di essere utilizzato in tempo reale, ciò che

⁷⁸ LANZA, *Petit inventaire d'objets quotidiens*, comunicazione dell'autore.

⁷⁹ LANZA, *Programma di sala* cit.

veniva perso in reattività, si guadagnava in libertà, potendo inventare ritmi e suoni dalle possibilità estese, pur rimanendo all'interno di vincoli di natura fisica. Come specifica l'autore, infatti,

la synthèse par modèle physique ne se présente pas comme de l'électronique pur, elle est à la frontière entre le monde acoustique et l'électronique, car l'approche est la même que si l'on prenait une chaise, que l'on commençait à scier une jambe et que l'on essayait d'obtenir telle ou telle note. Je suis confronté aux mêmes problèmes que dans le monde physique, mais les possibilités sont étendues avec le logiciel. Il m'est arrivé de faire du bidouillage impossible pour obtenir la note que je voulais obtenir!⁸⁰

Tramite l'impiego di Modalys, il compositore è, dunque, sollecitato a costruirsi gli strumenti da impiegare nella sua musica, divenendo, in tal modo, una sorta di liutaio che manipola direttamente i dispositivi meccanici che generano le sonorità, piuttosto che intervenire sulle sonorità medesime.

Se, però, in *Barocco* i comportamenti anomali, instabili e potenzialmente 'aberranti' erano provocati dalle caratteristiche degli strumenti giocattolo impiegati, in *Erba nera che cresci segno nero tu vivi*, essi derivano, invece, dalla manipolazione dei parametri 'esoterici' che controllano la sintesi per modelli fisici:

Cependant, fort d'une virtuosité enfin libérée des lois physiques, le compositeur n'en aspire pas moins au savoir-faire des anciens maîtres. Recourir à la technologie la plus avancée pour concevoir des instruments virtuels mais, somme toute, rudimentaires, et jouer d'une façon primitive la musique la plus élaborée : autant de paradoxes fertiles où a puisé à plein mon inspiration.⁸¹

Paradossi fecondi da cui Lanza attinge a piene mani con tale brano in cui una molteplicità di strumenti virtuali suonano contemporaneamente: per ogni nota sono attivati in interazione una corda, una membrana, un tubo o un piatto che mutano le loro caratteristiche (materiale, lunghezza, risonanza, ecc.) ad ogni nuova nota, dando vita, in tal modo, ad una elevata quantità di connessioni fra oggetti necessarie per ottenere suoni altamente caotici. In tal senso, l'autore sfruttando le potenzialità di Modalys, altera

⁸⁰ IMBAULT, *Intervista a Mauro Lanza* (16-10-2009) cit.

⁸¹ LANZA, *Programma di sala* cit.

le strutture strumentali precostituite e ibrida con percorsi inediti le diverse componenti dei modelli.⁸²

La gestione di tali complessità, che parte, come si è visto, dal recuperare la dimensione artigianale propria della liuteria, viene messa in atto mediante processi di composizione assistita (CAO) che prevedono l'utilizzo sia di OpenMusic, sia di Lisp:

A l'Ircam, il y a aussi tout un autre univers qui s'est ouvert à moi, qui était celui du contrôle de la synthèse. D'autres le faisaient déjà avant moi, notamment Marco Stroppa avec sa librairie Chroma. Je découvrais ainsi que les mêmes outils qui me servaient pour la composition assistée par ordinateur pouvaient aussi contrôler des paramètres sonores. Mes librairies m'aidaient donc à écrire du texte qui était ensuite envoyé à des moteurs tels que Modalys (logiciel de synthèse par modèles physiques que j'ai beaucoup utilisé pendant mes premières années ircamiennes) ou ensuite Csound, dont je me sers toujours (le plus souvent avec des bases de données d'échantillons).⁸³

L'interfaccia creata da Lanza per controllare Modalys dall'interno di OpenMusic – usando una programmazione, come afferma l'autore, preferibilmente di tipo testuale o anche grafica, per i lavori più veloci – appare essere nevralgica per i processi di costruzione del brano, poiché l'uso di uno stesso ambiente consente di applicare il medesimo formalismo sia alla parte strumentale, sia a quella elettronica, permettendo una forma di rappresentazione di alto livello, costituita da una partitura informatica, la quale controlla, a sua volta, diversi motori di sintesi.

In *Erba nera che cresci segno nero tu vivi* la formalizzazione ritmica, tramite CAO, implica, innanzitutto, lo sviluppo di un linguaggio gerarchico attraverso l'assemblaggio polifonico di pattern ritmici, principio, questo, che si estende alla melodia stessa, per generare voci secondarie automatiche. La relazione tra musica e testo interessa Lanza, non tanto nella sua dimensione retorica o semantica, quanto in quella formale, di cui riprende il modello di una struttura arborescente articolata su più livelli gerarchici, proposto dalle teorie della linguistica generativa, sviluppando un'idea di ritmo costituito da un sistema di vincoli che genera poliritmi che condividono punti salienti-(*onsets*) o che, nella parte finale, raggiungono la massima complementarietà possibile:

⁸² Cfr. DAVID GROISON, *Intervista a Mauro Lanza* (01-01-2001), <<https://www.01net.com/actualites/jai-compose-une-piece-pour-une-centaine-dinstruments-virtuels-137424.html>> (accesso 7-11-2021).

⁸³ LANZA, *Entretien #16* (luglio 2018), <<http://musiquealgorithmique.fr/entretien-16-mauro-lanza/>> (accesso 7-11-2021).

Dans mes premiers mois à l'Ircam, je me suis demandé ce que je pouvais faire avec l'ordinateur que je n'aurais pas pu faire à la main. Pour ma pièce pour voix et électronique *Erba nera che cresci segno nero tu vivi*, j'ai développé une technique de polyrythmies auto-engendrées par un arbre rythmique à haut niveau. Je parlais de ce que j'appelle un rythme à haut niveau, qui génère une polyrythmie avec une série de voix qui suivent des boucles rythmiques de longueurs différentes. Toutes ces boucles partagent certains impacts qui soulignent ce pattern à haut niveau. Ça s'entend beaucoup dans ma pièce pour voix et électronique car l'électronique est très stratifiée, avec parfois 9 ou 10 couches d'instruments.⁸⁴

Così, contrariamente all'idea di melodicità spesso associata alla voce, in *Erba nera che cresci segno nero tu vivi*, la componente ritmica è preponderante e la sovrapposizione di cicli ritmici e di unità ritmiche diverse è portata avanti con radicalità, pur evitando la saturazione grazie al principio gerarchico ereditato proprio dalla grammatica generativa di Noam Chomsky: tutti i pattern che compongono gli strati della spessa poliritmia condividono lo stesso antenato, un vero e proprio scheletro ritmico che si sviluppa in maniera organica nel corso di tutto il pezzo, donandogli «trasparenza e pregnanza e orientando la percezione della complessità».⁸⁵

In effetti, la relazione di affinità instaurata esplicitamente da Lanza tra la prospettiva di Chomsky e la strutturazione assunta in tale brano ben si comprende e, in un certo senso giustifica la sua necessità, in relazione alle possibilità offerte dai procedimenti formali della CAO che consentono una proliferazione controllata a partire da un numero finito di principi formali, una caratteristica che ricorda la tipica gerarchia del linguista statunitense in virtù della quale i formalismi grammaticali possono essere classificati in base alla loro *capacità generativa*, ovvero l'insieme dei linguaggi che possono idealmente rappresentare.⁸⁶ Il rapporto con Chomsky si coglie ancor meglio se si tiene conto delle modalità con cui quest'ultimo ha riletto l'approccio dello strutturalismo mettendo in luce la dimensione creativa del linguaggio. Infatti per poter

⁸⁴ *Ibidem*.

⁸⁵ LANZA, *Programma di sala* (13-06-2002)

<<http://vortice.provincia.venezia.it/Virtuosi%20Virtuali.htm>> (accesso 8-11-2021).

⁸⁶ Cfr. in part. Noam Chomsky, *La grammatica trasformativa. Scritti espositivi*, Bollati-Boringhieri, Torino 1975.

comprendere il funzionamento di una lingua è necessario metterne in luce la creatività sottesa, governata da regole per le quale vengono continuamente generate nuove frasi, cosicché la capacità linguistica non è fatta solamente di un insieme di parole, espressioni e frasi, ma di un insieme di regole e di principi ben definiti.

Ad un medesimo livello di regole e di principi ben definiti sembra agire la creatività di cui l'autore si fa interprete in questo brano. Infatti, mediante l'uso dei modelli fisici si dà vita ad una complessità virtualmente illimitata con un *corpus* assai ridotto di regole, prodotto dai vincoli stessi dell'algoritmo di modellizzazione, una limitatezza che permette al compositore di ricorrere, anche sul piano digitale, a un sistema di riproduzione 'imperfetto' in precedenza cercato nella fragilità degli strumenti-giocattolo.

17

50 *mf* *mf* *pp* *fpp* *mp* *mfppp*

che e e

The image displays a musical score for a piece titled "Erba nera che cresci segno nero tu vivi". The score is written for multiple voices or instruments, showing a complex heterophonic texture. The top staff includes dynamic markings: *p*, *f*, *p*, *f*, *mf*, *pp*, *f*, *p*, *ff*, *pp*, and *f*. The lyrics "e i e i e i e re che cre" are written below the first staff. The score consists of several staves, each with its own rhythmic and melodic line, illustrating the concept of "onsets" where different parts of the music start at different times but follow a common rhythmic pattern.

Fig. 3.24 Scrittura eterofonica e onsets in *Erba nera che cresci segno nero tu vivi*, bb. 50-55, ©Ricordi (per gentile concessione)

In *Erba nera che cresci segno nero tu vivi*, la strutturazione gerarchica diviene trasparente in quei momenti specifici esplicitamente organizzati in una sequenza ritmica, che crea strati di diverso rilievo. In figura 3.24, i punti accentati in sincrono (*onsets*) costituiscono lo schema ritmico originale che genera aritmeticamente le strutture ritmiche minori. Tale schema, all'interno del trattamento polifonico delle gerarchie ritmiche, viene evidenziato nei momenti in cui tutte le voci sono in sincrono: ogni voce ha una sua durata che si ripete per l'intera lunghezza del modello originale, mentre i sub pattern ritmici sono ottenuti da una divisione del pattern originale, la quale consente di generare sub pattern che vanno a coincidere con gli *onsets* del pattern originale.

La densità ritmica dipende dal numero di note nel modulo di un sub pattern, e può anche essere controllata da una funzione che crea alcuni vincoli restrittivi in modo da scegliere i pattern meno densi, utilizzando il motore di ricerca Pmc-engine (dalla libreria PWConstraints di Mikael Laurson).⁸⁷ Attraverso tale sistema di vincoli, il compositore è in grado di individuare i pattern che determinano il valore minimo consentito in una voce e di controllare il numero di note di ogni sub pattern a seconda della sua densità.

⁸⁷ Cfr. la documentazione dell'IRCAM relativa alla libreria in <<https://support.ircam.fr/docs/om-libraries/old/PW-Constraints.pdf>> (accesso 20-02-2022).

In alcune sezioni del brano vengono formalizzate anche le altezze in modo da creare schemi melodici corrispondenti alla periodicità dei sub pattern, cosicché le altezze rafforzano lo schema originale creando un'eterofonia:

Cette technique provient de l'intérêt que j'avais à l'époque pour l'ethnomusicologie. J'avais suivi des cours à l'Université de Venise, où un séminaire s'était tenu sur le concept de polyphonie, avec des personnalités comme Simha Arom. Il y avait eu notamment une discussion sur la différence entre polyphonie et hétérophonie. Simha Arom avait proposé en préambule que l'hétérophonie relevait de pratiques quasi improvisées, mais le séminaire avait mis en évidence des formes d'hétérophonie tellement complexes qu'elles relèvent de l'écriture. Ma source d'inspiration était la grande famille des hétérophonies du Sud-Est asiatique. Modéliser une forme musicale existante ne m'intéressait pas, mais je désirais faire quelque chose qui se rapproche de cette couleur. Cette hétérophonie mélodico-rythmique est un principe que j'utilise toujours. Même dans *Systema Naturae*, il y a par-ci par-là des choses générées de cette manière.⁸⁸

La complessità eterofonica ricercata da Lanza trova, dunque, espressione nel formalismo del mondo digitale che gli consente non solo di produrre nuovi suoni, ma anche di avviare complessi processi organizzativi, come, ad esempio, avviene in *Aschenblume* (2001), un brano per nove strumenti acustici – flauto, clarinetto, pianoforte, 2 set di percussioni, violino, viola, violoncello e contrabbasso – interamente governato da spettri di modelli fisici di strumenti immaginari che generano, a loro volta, peculiari mondi armonici. La dimensione armonica, infatti, scaturisce dalle qualità dell'oggetto che la produce: nel caso specifico, si tratta di due piastre circolari accordate sullo stesso *mi* grave, di cui una fissata ad un'estremità e l'altra al centro, in modo da produrre due spettri leggermente diversi. Ascoltando un punto o l'altro della placca, infatti, è possibile sentire degli armonici più forti di altri, dai quali si ottengono accordi di varia natura che sono parte di un grande antenato comune che risale al *mi* di origine. Il brano, dunque, si basa su modelli astratti che servono tanto per organizzare una forma coerente, quanto per gestire la dimensione armonica, con risultati particolarmente evocativi ed espressivamente efficaci, che derivano, come afferma l'autore, «proprio

⁸⁸ LANZA, *Entretien #16* cit.

dall'evitare, nella scrittura, le prime cose che vengono in mente: non c'è niente di meno evocativo che un gesto connotato che richiami dei *cliché*».⁸⁹

Mi affascina molto concepire gli accordi in base alla geometria dell'oggetto che li produce: qual è il suono di un cerchio o di una sfera? Indipendentemente dal materiale con cui è fatta, ogni geometria può dare origine a spettri diversi.⁹⁰

Il materiale armonico di *Aschenblume*, così, è ottenuto interamente da due spettri inarmonici 'simil-campana', creati tramite la sintesi per modelli fisici, dotati di un'enorme quantità di parziali non temperate [fig. 3.25]. Per poter essere utilizzate, le parziali sono approssimate in quarti di tono e il clarinetto è accordato un quarto di tono più basso, mentre strumenti quali il pianoforte e alcune percussioni suonano, per lo più note, temperate; nelle sezioni in cui sono necessarie più note le armonie vengono approssimate in semitoni.⁹¹



Fig. 3.25 Spettro della piastra circolare libera (in alto); spettro della piastra circolare bloccata (sotto), da SANCHEZ, *The Genesis of Mauro Lanza's Aschenblume*, p. 69.

⁸⁹ MARILENA LATERZA, *Intervista a Mauro Lanza* (10-03-2012), in <<https://marilenalaterza.wordpress.com/2012/03/10/mauro-lanza-intervista/>> (accesso 8-11-2021).

⁹⁰ JACOPO TOMATIS, *Intervista ad Andrea Valle* (07-11-2017), in <<https://www.giornaledellamusica.it/articoli/animismo-degli-oggetti-e-orchestre-elettromeccaniche>> (accesso 8-11-2021).

⁹¹ Cfr. JUAN CAMILO HERNANDEZ SANCHEZ, *The Genesis of Mauro Lanza's Aschenblume and the Role of Computer Aided Composition Software in the Formalisation of Musical Process*, *The OM Composer's Book 1*, ed. by di Carlos Agon, Gérard Assayag, Jean Bresson, Ircam, Centre Pompidou, Paris 2006, pp. 65-84: 69.

Ne deriva una sonorità omogenea in tutto il brano che non procede dalla rappresentazione musicale di un modello acustico, alla maniera della musica spettrale, bensì dall'utilizzo dello spettro come insieme delle note utilizzate, la cui coerenza formale è il risultato dell'organizzazione di sottoinsiemi di parziali, alcune delle quali hanno ampiezze maggiori a seconda di quale punto dello strumento virtuale venga auscultato. Per creare i sottoinsiemi di parziali, è stato utilizzato un apposito *constraint tool*, che filtra le parziali con l'ampiezza più debole, in modo da individuare i punti degli strumenti col minor numero di parziali che suonano simultaneamente. Ognuno di questi punti diventa l'armonia di una sezione del brano, e vengono eseguiti o come accordi con le corrispondenti ampiezze, o melodicamente come scala per ciascun strumento. I punti con parziali comuni sono usati come armonia delle sezioni correlate del pezzo, il che conferisce loro omogeneità armonica [fig. 3.26].⁹²

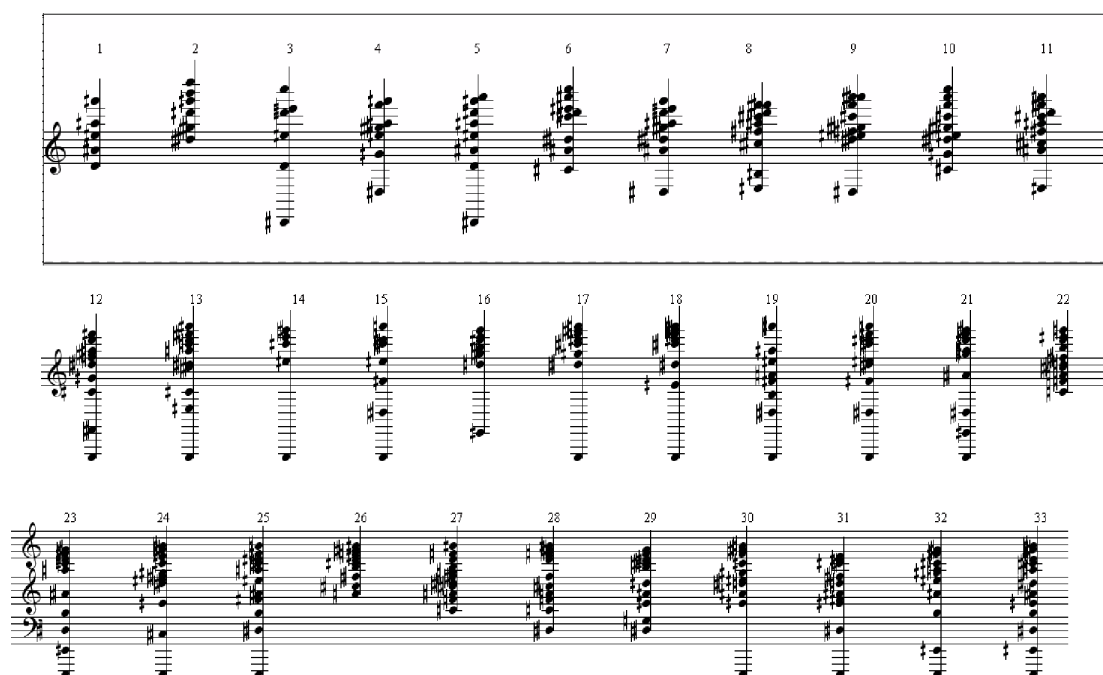


Figura 3.26 Enumerazione degli accordi ottenuti dalle parziali provenienti dal campionamento di diversi punti degli strumenti, da SANCHEZ, *The Genesis of Mauro Lanza's Aschenblume*, p. 69.

Aschenblume mette in scena una sorta di ostinato ritmico che si 'congela' gradualmente in un accordo sostenuto e che, nel corso del brano, subisce diverse metamorfosi,

⁹² Cfr. *ivi*, p. 69.

producendo configurazioni sempre più distanti da quella iniziale. Contemporaneamente, un processo di progressiva erosione ne diminuisce la durata:

What might have been perceived as a section at the beginning of the piece slowly becomes not much more than a grain of sand, an atom stripped of its qualitative properties. Thus, the process of progressive differentiation that has taken place up until now has been in vain a grain of sand, an atom stripped of its qualitative properties. Thus, the process of progressive differentiation that has taken place up until now has been in vain.⁹³

Durante il brano il materiale armonico del pianoforte si evolve, cambiando la struttura intervallare, che viene trasposta, mentre gli altri strumenti rimangono armonicamente simili alla loro prima apparizione. L'accordo sostenuto di arrivo subisce una crescente metamorfosi armonica, mentre dinamica e orchestrazione si evolvono, utilizzando come modello le ampiezze degli accordi estratti dagli spettri degli strumenti virtuali.

Così, sia l'utilizzo di strumenti giocattolo, sia quello di strumenti virtuali, sia, infine, l'impiego di strumenti acustici che ricreano spettri di strumenti immaginari, sottintende l'idea fondante della necessità di un allargamento dell'idea di strumento rispetto ai canoni della liuteria tradizionale, allargamento che caratterizza anche il caos strutturato costituito dal groviglio di suoni «apparentemente triviali» de *I funerali dell'anarchico Passannante* (2006), per coro di trentadue cantanti, senza testo. Il brano è stato scritto per un anarchico, che non ha avuto sepoltura, protagonista di un tentato regicidio, un evento che, al pari dei riti funebri di certe società antiche o rurali, capovolge le dinamiche del lutto con una sospensione della legge e dell'ordine sociale perpetrata da chi ha esercitato il suo diritto di trasgressione della legge perché qualcun altro prima di lui l'aveva, a sua volta, sospesa. Il substrato concettuale dell'opera si ispira al concetto di «stato di eccezione» di Giorgio Agamben che testimonia dello stretto legame che intercorre tra lutto, anarchia e festa⁹⁴: al capovolgimento dei comportamenti tipico delle situazioni luttuose, e al vuoto giuridico creato dal *iustitium* corrisponde, infatti, una sorta di legalizzazione dell'anarchia mediante l'inversione dei rapporti sociali, come

⁹³ LANZA, *Programma di sala* (08-03-2005), <<http://smcq.qc.ca/smcq/en/oeuvre/21532/Aschenblume>> (accesso 8-11-2021).

⁹⁴ Cfr. GIORGIO AGAMBEN, *Iustitium. Stato di eccezione*, in *Homo sacer*, Quodlibet, Macerata 2018, pp. 169-250.

accade nelle feste anomiche quali i *Saturnalia* o il Carnevale, i cui i riti di inversione sono messi in rapporto con la detronizzazione e la morte del sovrano:

Quale musica si può concepire per un anarchico morto insepolto, per un funerale che non ha avuto luogo? Una musica che sovverta la dinamica del lutto, un disordine ritualizzato alla maniera dei rituali di inversione (*contraria facere*) che accompagnano gli eventi luttuosi in certe società antiche o rurali. Come in questi rituali, l'ordine sociale era sovvertito, i ruoli (anche quelli sessuali) capovolti, i peggiori crimini ed eccessi tollerati, i più semplici gesti quotidiani eseguiti al contrario, così i 32 cantanti mettono da parte il loro *savoir-faire* vocale per inscenare una farsa carnascialesca composta da suoni che normalmente sono catalogati come 'non musicali'. Come nel caso dei *contraria facere*, si tratta di un disordine regolamentato, un caos organizzato nei minimi dettagli, e questi suoni, apparentemente triviali, sono catalogati con la stessa attenzione che Cesare Lombroso dedicava al cranio della prostituta, dell'alcolista o dell'anarchico.⁹⁵

In un universo sonoro che rispecchia tale mondo alla rovescia – e in cui anche gli stessi cantanti sospendono la vocalità consueta per abbandonarsi ad una sorta di farsa carnevalesca composta da emissioni sonore normalmente classificate come 'non musicali' –, Lanza raggruppa i suoni, secondo la loro morfologia, in quattro declinazioni distinte: vocali, meccanici (kazoo, giocattoli sonori), meccanici virtuali (sintesi per modelli fisici) o puramente elettronici [fig. 3.27]. Oltre alle articolazioni vocali ordinarie, ne sono previste altre non ordinarie quali, ad esempio, cantare ispirando ("quasi un raglio d'asino"), *trumpet* (l'effetto di una sorta di un barrito), schiaffeggiarsi una guancia "con la bocca aperta come pronunciando un 'O'". Relativamente alla seconda categoria, compare un gran numero di oggetti e *noisemakers* eseguiti dagli stessi cantanti, impegnati in gesti esecutivi del tutto fuori dall'ordinario, tra i quali, ad esempio, il *Fart Whistle* (che si suona soffiandoci energicamente dentro), il *kazoo with trumpet end*, "che si suona cantandoci dentro con effetto wah wah" e aprendo e chiudendo rapidamente il padiglione con la mano sinistra, mentre, nel contempo, si apre e si chiude gradualmente con la mano destra la parte superiore del Kazoo (dove è situato il buzzer).⁹⁶

⁹⁵ LANZA, *I funerali dell'anarchico Passannante*, presentazione dalla partitura, Ricordi, Milano 2006.

⁹⁶ Altri strumenti/oggetti eseguiti dai cantanti sono: *fart whistle*, *kazoo*, *wildly noisy wooden thing*, flauto a coulisse, *le farter*, *giggle stick*, pupazzo che squittisce, *self-inflating*, *whoopee cushion*, *blowout*, richiamo

I modelli fisici simili a quelli usati in *Burger Time*, quali *Bonk* e *Ancie*, sono, invece, costituiti da oggetti percussivi con modi aleatori che suonano come bidoni della spazzatura e da oggetti ibridi percossi da una sorta di martello pneumatico controllato da una sinusoide a frequenze audio, il cui risultato sonoro è fra il rutto e il gracchiare di una rana. A questi modelli si accompagnano altri suoni elettronici: le *scorre* sono suoni di simil-scoreggia ottenuti semplicemente leggendo un buffer; *rutti* e *gluglu* (gargarismi) sono ottenuti con i FOF (forme d'onda formantiche): i *rutti* si ottengono con un random sulla frequenza della fondamentale, i *gluglu*, con un random sulla frequenza delle formanti; mentre i *pupazzi* sono un 'taglia e cuci' di suoni di pupazzi reali, analogamente a quanto avviene in *Barocco*.

Nel complesso, il brano è caratterizzato da una vera e propria esplosione di mondi sonori che si intersecano articolando la dialettica tra la scrittura, consegnatisi alla partitura, e l'imprevedibilità sonora frutto di tali strumenti altri, quali voci 'aumentate', oggetti sonori complessi e instabili, e strumenti virtuali.

del cinghiale, tubo zigrinato per i cavi elettrici, *siren whistle*, *octo-block* (*rotary drum*), fischietto trifonico, *music-box* a manovella, ancia di oboe, ancia di fagotto, *waldteufel*, *water wistle*, raganella, brochure...

The image displays a musical score for a funeral, featuring multiple staves with various musical notations, including notes, rests, and dynamic markings. The score is divided into sections labeled "Grid", "Gluglu", "Ancle", "Scorre", "Barriti", "Grid", and "Bank". The notation includes various symbols for electronic sounds, mechanical instruments, and vocal techniques. The score is numbered 117 on the left margin.

Fig.3.27 Diverse tipologie di 'strumenti' e articolazioni esecutive: tecniche vocali non tradizionali, strumenti meccanici, modelli fisici e altri suoni elettronici in I funerali dell'anarchico Passannante, bb. 117-119, ©Ricordi (per gentile concessione)

Tale esplosione viene esplorata in modo estremo in *Vesperbild*, per ensemble, strumenti giocattolo ed elettronica, epilogo strumentale del ciclo vocale *Nessun suono d'acqua*.⁹⁷

L'usage d'instruments d'enfant, jouets rudimentaires et modèles physiques informatiques au comportement imprévisible que j'ai fait dans pièces tels que *Vesperbild* est une tentative d'élargir la brèche entre notation et phénomène sonore jusqu'au point de non retour d'un chaos soigneusement noté, d'une écriture qui produit ses propres parasites.⁹⁸

Parassiti deliberatamente cercati, sebbene vengano solitamente evitati, che danno vita a quel *side effect* che costituisce una volontaria perturbazione del sistema testo-interprete-suono, enfatizzandone la sua già costitutiva non-linearità.⁹⁹ Tale poetica, perseguita dall'autore sul lungo periodo, lo condurrà ad esplorare la ricchezza del non-umano, suggeritagli da una frase paradigmatica pronunciata da Grisey a proposito di *Tempus ex machina*: «la composition par processus sort du geste quotidien et par cela même nous effraie. Elle est inhumaine, cosmique et provoque la fascination du Sacré et de l'Inconnu, rejoignant ce que Gilles Deleuze définit comme la splendeur du ON : un mode d'individuations impersonnelles et de singularités préindividuelles».¹⁰⁰

Così se, da un lato, i processi algoritmici possono porsi al servizio della resa sonora, dall'altro sono proprio questi ultimi a poter innescare un attrito tra una partitura molto rigida, determinata e meccanica, e suoni che resistono ad un tale controllo, una resistenza che all'autore dà l'impressione di lavorare, metaforicamente, con le impurità dell'analogico, piuttosto che con la purezza del digitale.

L'intitolazione del brano (*Vesperbild*) allude all'ambiguo lamento di un fiume-cadavere¹⁰¹ e, soprattutto, all'ironica istantanea di una Pietà barocca che apre il ciclo vocale. Il lamento è costituito da una serie di ripetizioni costruite su ritmi asincroni, dall'incantatoria scrittura eterofonica, dagli esiti sempre più imprevedibili.

⁹⁷ Cfr. LANZA, *Programma di sala* (28-05-2007), <<https://brahms.ircam.fr/works/work/18977/>> (accesso 9-11-2021).

⁹⁸ LANZA, *Programma di sala* (17-06-2012), in <<https://brahms.ircam.fr/works/work/41092/#program>> (accesso 9-11-2021).

⁹⁹ Cfr. Intervista a Mauro Lanza e Andrea Valle per la prima italiana di *Regnum* cit.

¹⁰⁰ GERARD GRISEY, *Tempus ex machina*, in *Écrits*, éditions MF, Paris 2008, p. 84. La citazione proviene da GILLES DELEUZE, *Différence et répétition*, PUF, Paris 1968, p. 4.

¹⁰¹ Si veda, al proposito, il testo di *Mare* di Amelia Rosselli, riportato alla nota 79.

Successivamente, entrano in scena strumenti percussivi virtuali – gli stessi utilizzati in *Erba nera che cresci segno nero tu vivi*, (si veda figura 3.28 che ne evidenzia la similitudine di scrittura) –, pupazzi cinguettanti, strumenti dal timbro distorto e bovini finti dal triste muggito, come si trattasse di un coro di pupazzi a costituire un ensemble strumentale classico, con una serie di strumenti per bambini e un’elettronica sintetica in vicendevole imitazione.

Fig. 3.28 Passaggio da un glissando di altezze determinate a una poliritmia di suoni ad altezze indeterminate negli strumenti virtuali in *Vesperbild*, bb. 218-221, ©Ricordi (per gentile concessione)

Così, nel brano, gli strumenti virtuali alternano episodi di eterofonia ritmica a glissandi strumentali, senza soluzione di continuità, amplificando la scrittura degli strumenti acustici, così come quella dell’ensemble di strumenti giocattolo, alla cui fisiologica fragilità si aggiunge l’imprevedibilità sonora dei modelli fisici. Nel seguente estratto della partitura [fig. 3.29 a-b], si evidenzia la convergenza di scrittura del glissando degli strumenti acustici e di quello, ad altezze non determinate, degli strumenti virtuali (bb. 318-9). Segue un breve episodio ritmico eseguito dagli strumenti giocattolo

e da altri oggetti a fiato (b. 320), a sua volta, seguito da un altro intervento ritmico degli strumenti virtuali con altezze definite, le quali, poi, mutano in impulsi ritmici asincroni (b. 321), che preparano, infine, l'entrata degli sforzati ritmici degli strumenti giocatolo (b. 322). In tale episodio esemplificativo tutto accade velocemente, con un'estrema fluidità di scrittura e di alternanza/convergenza timbrica.

Fig. 3.29 a is a musical score for a large orchestra and a vocal soloist. The score is divided into two systems. The first system includes Flute (Fl), Clarinet (Cl), Horn (Hrn), Trombone (Tbn), Percussion (Perc1), Piano, Violin (Vn1), Cello, Double Bass (Dbass), and a vocal soloist (Mac). The second system includes Bassoon (bsn), Oboe (ob), Clarinet, Bassoon, Trumpet (tpt), Violin (vn2), Percussion (perc2), and a vocal soloist (Mac). The score includes various musical notations such as notes, rests, and dynamic markings. The tempo is marked as 4/4, and the key signature is one flat. The score is written for a vocal soloist (Mac) and a large orchestra. The vocal soloist part is written in a single staff, and the orchestra parts are written in multiple staves. The score includes various musical notations such as notes, rests, and dynamic markings. The tempo is marked as 4/4, and the key signature is one flat. The score is written for a vocal soloist (Mac) and a large orchestra.

Fig. 3.29 a

The musical score for Fig. 3.29 b is a complex orchestration featuring a variety of instruments and time signatures. The score is divided into two main sections, each with a different time signature: 5/16 + 3/8 and 3/4. The instruments listed on the left include Flute (Fl), Clarinet (Cl), Horn (Hrn), Trombone (Tbn), Percussion (Perc1), Piano, Violin (Vn1), Cello, Double Bass (Dbass), Piccolo (Pic), Maracas (Mac), Banjo (ban), Cymbal (cymb), Oboe (ob), Trumpet (tp1), Violoncello (vn2), Percussion 2 (perc2), and Trombone 2 (trb2). The score includes various musical notations such as notes, rests, and dynamic markings (f, mf, sfz). Time signatures are indicated at the top of the score: 5/16 + 3/8 and 3/4. The score is written for a large ensemble, with multiple staves for each instrument. The notation is complex, with many notes and rests, and includes various musical symbols and markings. The score is a detailed and intricate musical composition, reflecting the composer's vision of a complex and layered sound world.

Fig. 3.29 b

Figg. 3.28 a-b Convergenza/alternanza di scrittura di strumenti acustici, strumenti virtuali, strumenti giocattolo in Vesperbild, bb. 317-322, ©Ricordi (per gentile concessione)

Questo ampliamento del mondo sonoro, che caratterizza la poetica di Lanza, trova una sua nuova totalizzante amplificazione nel lavoro successivo, *Descrizione del diluvio*

(2007) – opera multimediale realizzata in collaborazione con Paolo Pachini per sei voci, sei percussionisti, elettronica e proiezione di video su 8 schermi (16:9) –, nel quale il testo di Leonardo sul cataclisma biblico,¹⁰² come pure i suoi disegni sul medesimo soggetto, sono impiegati come matrice per generare un vasto diluvio musicale e visivo:

En conséquence, il ne s'agira pas d'une représentation du «Déluge»; il s'agira d'une construction de formes différentes et innovantes de Déluge sur tout sujet, à partir de celle que la simple lecture du texte produit dans notre corps [...] Il s'agira essentiellement d'explorer et de moduler un espace esthétique dont les extrêmes sont, d'une part, le jeu des signes pur et simple et, de l'autre, la matière plus violente et sourde, en passant par des oasis dont le symbole et le sens partagent une heureuse évidence objectale.¹⁰³

La parte elettronica, che utilizza ampiamente i modelli fisici, è diffusa da un impianto di 8/12 altoparlanti disposti intorno al pubblico, e rappresenta il punto di incontro tra il mondo delle voci e quello delle percussioni, all'interno di uno spazio in cui quest'ultimo è circondato, pure, dagli otto schermi che proiettano il video a 360°, in una sorta di affresco immaginario. Come puntualizzato dal compositore, la partitura traduce sul piano musicale la 'tassonomia del disastro' per mezzo di una graduale trasformazione della materia musicale stessa, a rappresentare la fluidità dei fenomeni naturali, che si alterna a eventi fissi e privi di direzionalità, che cercano di documentare quanto avvenuto esorbitando da qualsivoglia forma di giudizio etico, senza evocare né dannati, né salvati, ma unicamente sommersi.

Rispetto a brani, quali *Erba nera che cresci segno nero tu vivi o*, anche, *Vesperbild* – nei quali elettronica consiste esclusivamente nell'utilizzo di Modalys per dar vita ad un'orchestra che suona solo strumenti virtuali – in *Descrizione del Diluvio*, le tecniche di

¹⁰² «Ma la ringorgata acqua si vada raggirando pel pelago, che dentro a sé la rinchiude, e con retrosi revertiginosi in diversi obbietti percotendo e risaltando in aria colla fangosa schiuma, poi ricadendo e facendo refrettere in aria l'acqua percossa. E nessuna cosa più lieve che l'acqua era, che non fussi coperta di diversi animali, e quali, fatta tregua, stavano insieme con paurosa collegamento, infra' quali era lupi, volpe, serpe e d'ogni sorte, fuggitori della morte». LEONARDO DA VINCI, *Descrizione del diluvio* (Codice Windsor, fol. 12665r), in *Scritti letterari*, a cura di Augusto Marinoni, Rizzoli, BUR, Milano 1952, Kindle edition, pos. 2428.

¹⁰³ LANZA, *Programma di sala* (14-03-2008), in <<https://brahms.ircam.fr/works/work/32254/>> (accesso 9-11-2021).

modellizzazione si integrano ad altri procedimenti compositivi quali il campionamento, e la sintesi concatenativa (usata anche per le voci),¹⁰⁴ etc.

Nella terza parte del brano, vengono usati gli stessi strumenti di *Erba nera che cresci segno nero tu vivi*. Si tratta di oggetti percossi e caotici, cluster di oggetti che sbattono fra di loro e creano una molteplicità di *side effects*, accompagnati, come in *Vesperbild*, alle percussioni dal vivo con sonorità sporche quali, ad esempio, il clangore metallico dei campanacci preparati o dei tam-tam suonati orizzontalmente, che creano, nel complesso, un suono un po' sporco, (*rattling*).

Nella seconda parte di *Descrizione del Diluvio* vengono usate delle placche geometricamente simmetriche (rettangolari e circolari) eccitate da un rumore bianco, i cui involuppi d'ampiezza creano un effetto spazzolato. I gesti di tali strumenti sono procedimenti del tutto nuovi e originali, che derivano proprio dalla idiomatichità dei modelli fisici. In particolare, le placche, usate dal compositore, essendo degli oggetti bidimensionali simmetrici – che risuonano sia longitudinalmente sia trasversalmente alla stessa frequenza. La 'messa nel tempo' di tali modelli permette al compositore di creare dei particolari 'glissandi di modi', ottenuti attraverso la creazione di oggetti che rappresentano fasi discrete dell'interpolazione di un modello su se stesso. Si crea, così, una sorta di glissando infinito che deriva dalla combinazione di modi forti, che restano fermi, e di modi deboli che glissano ad ogni interpolazione, procedimento, il quale richiama percettivamente sia il glissando infinito di Risset e il paradosso Shepard (§ 1.2.2), sia quanto accade nella parte del pianoforte del secondo movimento di *Vortex temporum*, di Grisey.¹⁰⁵ In tali glissandi di *Descrizione del diluvio*, così come avviene in altri brani già discussi, i processi di modellizzazione vengono rinforzati dagli strumenti acustici. Così, le note che restano invariate vengono anche affidate a delle armoniche a bocca con la funzione di sfumare le sonorità in tempo reale.

Nel 2008, appena un anno dopo la *Descrizione del diluvio*, Lanza realizza una nuova versione stereo di *Burger Time ou les tentations de St. Antoine*, originariamente concepito per tuba e elettronica a 8 canali (2001), utilizzando esclusivamente modelli

¹⁰⁴ Cfr. in part. DIEMO SCHWARZ, *Current Research in Concatenative Sound Synthesis*, in *Proceedings of the International Computer Music Conference (ICMC)*, Barcelona 2005, pp. 1-4.

¹⁰⁵ Cfr. in part. JEAN-LUC HERVÉ, *Dans le vertige de la durée (Vortex Temporum de Gérard Grisey)*, L'Harmattan, Paris 2001.

fisici. Il brano, da un lato, è un omaggio al mondo dei videogiochi-arcade dei primi anni Ottanta, di cui si citano, ad esempio, le musiche di *Dig Dug*, *Bombjack*, *PacMan* e, naturalmente, *BurgerTime*, e, dall'altro, rimanda ad un *topos* narrativo e figurativo tipico del 'Moyen Âge fantastique', a sua volta ripreso da Gustave Flaubert.¹⁰⁶

Andrea Valle – elaborando un approccio analitico ecologico, idealmente ispirantesi all' *Auditory Scene Analysis* di Bregman,¹⁰⁷ la quale mira a studiare la percezione uditiva all'intero di un contesto ambientale – identifica nel brano undici figure, da lui suddivise in due gruppi che articolano l'opposizione tra 'flussi' e 'oggetti': i flussi consistono in un'emissione multipla e coerente proveniente da una determinata fonte – *tromba, cymbalom, frog, pluck...*–; gli oggetti, in un insieme di figure caratterizzate da una ripetizione esatta, anche se talvolta incompleta, che ne connota la natura: *allarme, glock, campanello, canzone...* Se il primo gruppo descrive un insieme di 'attori' – ciascuno dei quali dotato della competenza specifica di generare suono (uno strumento) e per questo soggetto ad essere ricostruito come 'impronta'; gli oggetti, invece, secondo la definizione degli studi sul paesaggio sonoro, sono propriamente dei segnali brevi, con confini precisi, esattamente ripetuti.¹⁰⁸

Così, *Burger Time*, pur presentandosi all'ascolto come una superficie unica, rivela al suo interno un'enunciazione – nel senso di una categoria percettiva che implica la presenza di un messaggio acustico – che opera secondo due regimi diversi: da un lato, allestisce un teatro in cui suonano strumenti sconosciuti ma ecologicamente validi, dall'altro 'incolla' sulla medesima superficie un insieme di frammenti già pronti, che non costituiscono un accostamento paratattico di elementi diversi, bensì una sorta di effetto olografico messo in atto dall'enunciazione medesima [fig. 3.30].

¹⁰⁶ LANZA, *Programma di sala* cit.

¹⁰⁷ Cfr. ALBERT S. BREGMAN, *Auditory Scene Analysis. The Perceptual Organization of Sound*, M.I.T. Press, Cambridge 1990.

¹⁰⁸ ANDREA VALLE, *Burger Time ou les Tentations de saint Antoine, or Not Wanting to Say Anything About Mauro Lanza, Gustave Flaubert and Peter Pepper*, «Flaubert [En ligne]», XXI (2019), mis en ligne le 01 juin 2019, consulté le 08 novembre 2021. URL: <<http://journals.openedition.org/flaubert/3650>>.

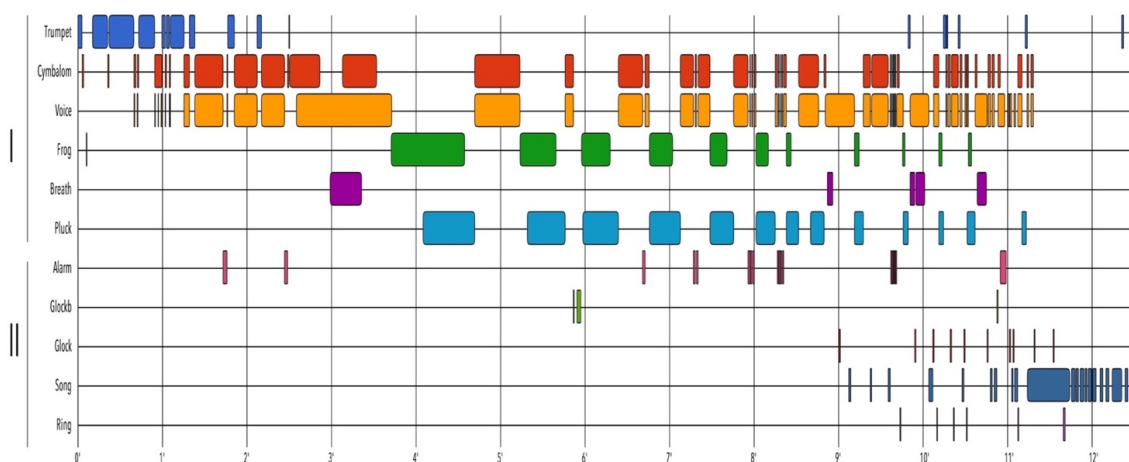


Fig. 3.30 Partitura figurativa di Burger Time derivata dalle figure riconoscibili nel segnale audio. Il I gruppo (flussi), in alto, il II (oggetti) in basso (da Andrea Valle, Burger Time ou les Tentations de saint Antoine).

Come si evince dalla figura 3.30, il primo gruppo si dispiega nel tempo come una sorta di molla, i cui flussi prima si dilatano e poi si restringono nella durata, fino alla compressione finale, laddove il secondo, invece, viene introdotto molto progressivamente e, a differenza del primo gruppo, è sottoposto ad un processo di addensamento. Ne consegue che l'organizzazione complessiva del brano è basata sulla nozione di processo che descrive lo stile complessivo di configurazione, una nozione che, peraltro, costituisce il nucleo fondante dell'agire compositivo di Lanza.

Inoltre, Valle elabora un'interpretazione semiotica integrata tenendo conto dei livelli precedenti d'analisi e di un documento testuale (il programma di sala del brano), al fine di evidenziare le isotopie semantiche più rilevanti, il cui scopo è proprio quello di distribuire il senso di tale testo per sostenerne la coesione interna incrociandolo, poi, con la testualità musicale del brano, i cui elementi possono essere raccolti e ordinati rispetto all'asse inizio/fine in una classica articolazione narrativa:

In short, assuming an integrating perspective based on the redundancy of distributed isotopies, the fragmented aggregate seems to set up a classical narrative form. But if the narrative form that can be reconstructed from the program note is classical, nevertheless it is disturbed by the perturbing figurative elements (monstrosity, that turns towards grotesque in Burger Time) and by the enunciative work that deliberately collides different, heterogeneous sources in a collage without attempting any harmonization.¹⁰⁹

¹⁰⁹ /vi, par. 41.

Si crea, così, una discordanza tra una forma narrativa piuttosto leggibile e progressiva, che addensa e concentra le figure lungo il pezzo, e la presenza di elementi figurativi perturbanti – mostruosi o grotteschi – senza alcuna esigenza di armonizzazione, bensì con la messa in scena di una continua collisione di oggetti e figure del tutto eterogenee. Se il mostruoso deriva dall'ibridazione di figure diverse (i flussi), il grottesco, invece, scaturisce dai comportamenti degli oggetti che collassano su se stessi e dai dispositivi sonori che accelerano come se si contraessero spasmodicamente (gli oggetti), una dialettica questa che sembra ripercorrere l'opposizione su cui il titolo stesso dell'opera è costruito mediante l'accostamento paratattico delle tentazioni di Sant'Antonio (mostruoso) con le dinamiche del videogame *Burger Time* (grottesco).

La ricognizione dei principali nessi dell'analisi di Valle permette di verificare ulteriormente con quanta efficacia il ricorso ai modelli fisici in *Burger Time* venga impiegato per realizzare uno degli aspetti fondanti la poetica dell'autore: quella 'rivolta degli strumenti' perseguita con lucida consapevolezza durante un lungo ed intenso periodo di studio e di riflessione critica, una rivolta degli strumenti che si realizza, in questo brano, mediante tutta una serie di trasformazioni degli oggetti/strumenti, dal mostruoso al grottesco, che solo il ricorso al mezzo elettronico poteva permettere di conseguire. Così, ancora una volta, lo strumento virtuale si costituisce all'interno di una concezione metaforica delle sue peculiarità/funzionalità: il passaggio dal mostruoso al grottesco, infatti, sembra quasi rappresentare un 'eccesso di mondo', attivato da una serie di strumenti altri che producono a loro volta una irriducibile alterità.

Anche i brani composti da Lanza negli ultimi dieci anni, spesso scaturiti da idee extra-musicali, pur continuando ad esplorare tematiche che si rifanno idealmente a quanto già sperimentato, ne allargano significativamente gli orizzonti come, ad esempio, il mondo degli automi e la meccanizzazione dei processi corporei in *The Kempelen Machine* (2015) e *Anatra digeritrice* (2014); il carnevale, l'anarchia e la nozione di stato d'eccezione di Agamben in *Ludus de morte regis* (2013) e *La Bataille de Caresme et de Charnage* (2012); le idee per l'installazione visiva de *Le Nubi non Scoppiano per il Peso* (2011), e, infine, le opere, in collaborazione con Andrea Valle, del ciclo *Systema naturae* (2013-2017). All'interno di tale orizzonte complessivo, lavori come *Ludus de morte regis* e *Le Nubi non Scoppiano per il Peso* (2011) utilizzano i modelli fisici al fine di conseguire un significativo allargamento timbrico ed espressivo, come

pure di ridefinire, in profondità, il linguaggio, dando voce ad un universo di sonorità nuove, nobili come triviali, che rivelano all'orizzonte del sensibile tutta la meraviglia dell'inatteso. Tali materiali vengono gestiti, a loro volta, da processi astratti sempre più formalizzati, in un apparente paradosso che lega, in un continuo feedback, imprevedibilità e organizzazione, sorpresa e pianificazione. Così, ai sistemi di vincoli usati in *Erba nera che cresci segno nero tu vivi*, si aggiungono altri innumerevoli processi algoritmici di gestione del materiale quali, le catene di Markov (come per la musica del film *Häxan*, 2008), i sistemi Lindenmayer (in alcune parti di *Systema naturae*), i canoni a mosaico (*La Bataille de Caresme et de Charnage*, 2012), i canoni di Vuza (*Descrizione del Diluvio*), gli automi cellulari (*John Conway in gondola*, 2016), fino ad esplorare strutture armoniche risultanti dalle analisi geometriche generate con la libreria di elementi finiti di Modalys, quali, ad esempio, gli accordi derivanti da *nastri di Möbius* utilizzati in *Experiments in the revival of organisms* (2019), per orchestra.¹¹⁰

Quest'ultima composizione, incentrata sul tema della resurrezione, è ispirata ad un breve filmato del 1940 girato in Unione Sovietica per documentare alcuni esperimenti sulla rianimazione di organismi clinicamente morti, da cui deriva anche il titolo del brano. Essa si struttura come una sorta di 'cornice', che racchiude un piccolo frammento di Mahler – dal movimento finale della Sinfonia n. 2, detta *Sinfonia della Resurrezione* – suddiviso in due parti, che dà vita ad un brano costituito da due sezioni, la prima delle quali caratterizzata da un lento accumulo basato inizialmente su sibili omofonici acuti (quasi il suono di un elettrocardiogramma) – che culmina in un accordo fff che gradualmente si scioglie, facendo riemergere il frammento di Mahler –; e la seconda, da una musica diatonica, a due parti, basata sulla seconda parte della citazione di Mahler, che gradualmente diviene sempre più densa, rallentando per poi dissolversi.¹¹¹ In figura 3.31, viene raffigurata la generazione del materiale armonico in OpenMusic, derivante dall'analisi modale di un *nastro di Möbius*, che costituisce l'accordo in fortissimo della prima parte: in particolare, la funzione FEM di Modalys

¹¹⁰ VALLE – MAURO LANZA, *Systema naturae: Shared Practices Between Physical Computing and Algorithmic Composition*, in *Proceedings of the 14th Sound and Music Computing Conference*, Aalto University, Espoo 2017, pp. 391-398; LUCA GUIDARINI, *Tra nubi, selve, giardini e tassonomie: nuova liuteria elettromeccanica ed elettroacustica nelle pratiche musicali di Mauro Lanza, Andrea Valle e Simone Pappalardo*, «Musica/Tecnologia», XV (2021), pp. 31-80.

¹¹¹ Cfr. LANZA, *Programma di sala* (21-03-2019), in <<https://www.ricordi.com/it-IT/News/2019/03/Lanza-in-Cologne.aspx>> (accesso 9-11-2021).

permette di definire la geometria (mesh) da cui dipendono le proprietà sonore, oltre ai parametri del materiale e alle condizioni limite (la parte fissa della mesh), il cui comportamento dinamico è definito utilizzando la teoria modale.

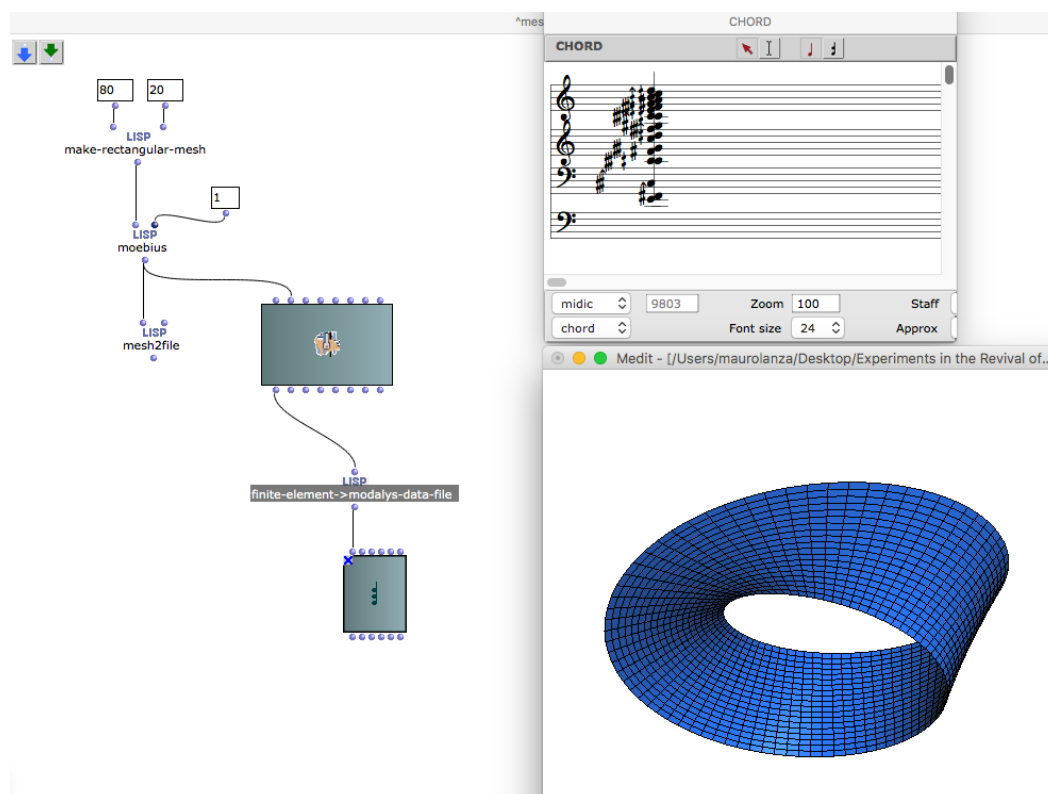


Fig. 3.31 Materiale armonico derivato dall'analisi modale di un nastro di Möbius usato in *Experiments in The revival of organisms*¹¹²

L'utilizzo di spettri di modelli fisici sottesi ad organici, che a prima vista appaiono del tutto tradizionali, è una modalità a cui Lanza è rimasto fedele nel tempo: da *Aschenblume*, a *The skin of the onion* (2002), da *#9* (2009) al *Discorso di Gagarin attorno alla Terra* (2017), per due pianoforti, in cui vengono usati esclusivamente spettri di placche quadrate. Osservare l'ampio organico di *Experiments in the revival of organisms*, ad esempio, non sembrerebbe far presagire che l'interna struttura del brano promani dall'impiego di tecniche algoritmiche così altamente formalizzate. Il paradosso che Lanza introduce in queste opere è quello di una presenza fondante che si costituisce nell'assenza: il ruolo che la sintesi per modelli fisici ha avuto nella ridefinizione del

¹¹² LANZA, *Entretien #16* cit.

linguaggio appare tanto profondo e tanto strutturalmente necessario che parrebbe non potersi prescindere da esso neppure quando non vi è traccia materica delle sonorità costituite da tali procedure. Tale svincolarsi da ogni materialità diretta espressa dal mezzo tecnico pare assolvere, così, ad una fondamentale funzione strutturante, che ritorna, poi, in modo ellittico, alla materialità precedentemente sottaciuta.

3.6 Conclusioni

Sebbene i tre casi di studio analizzati rappresentino rifrazioni diverse dell'uso della modellizzazione fisica, li accomuna tutti una nozione di necessità che, da un lato, ne giustifica l'impiego, e, dall'altro, diviene il centro di una riflessione sulle tecniche che si fa riflessione estetica. Seppur in maniera più o meno diretta e con esiti artistici diversi, le composizioni dei tre autori appaiono essere incentrate su meccanismi di produzione del suono che la natura stessa del modello suggerisce e promuove: Lupone li pone in relazione con le tecniche esecutive estese degli archi; Kojs li contestualizza in relazione ad un agire archetipico e 'pre-linguistico'; Lanza, invece, pur partendo anch'egli dal gesto virtuale, li mette in relazione con sofisticate tecniche di formalizzazione, per poi sublimarli, attraverso la messa in atto di oggetti matematici astratti nello spazio virtuale che, paradossalmente, possono risuonare anche attraverso gli strumenti tradizionali dell'orchestra.

Il rifarsi variamente ad un agire complesso che si fa gesto musicale intenzionale, apre, così, a nuovi percorsi in cui la modellizzazione fisica si situa all'interno del processo creativo stesso e della formalizzazione del linguaggio, producendo esiti che, anche se molto diversi, si inscrivono tutti, da un lato, nella virtualizzazione dei processi della creazione, e, dall'altro, inversamente, nella loro stessa ri-attualizzazione: se gli elementi della formalizzazione del linguaggio vengono attraversati dal controllo del digitale, che li imbriglia nelle maglie del formalismo binario, d'altra parte, all'interno di un percorso inverso, tali formalizzazioni stesse ricadono nel dominio del mondo fisico, nei campi prossimi della percezione, della costruzione degli artefatti e della loro ridefinizione, ideativa e organizzativa, che si aprono, in simbiosi, a significati altri.

Proprio tale scambio simbiotico tra virtualizzazione e ri-attualizzazione non pare mai essere assente nei tre casi analizzati: in tutti, infatti, le due realtà, fisica e virtuale, si sono ibridate in funzione di un personale percorso e di un peculiare esito artistico.

Corda di metallo di Lupone, tra quelli analizzati, costituisce il primo caso di tale interscambio: il ricorso alla modellizzazione della corda, in quanto componente espressiva necessaria a realizzare l'idea fondante dell'opera, permette il costituirsi di un'immagine espressiva ben delineata – in funzione dell'articolazione di parametri fisici interni alla corda, gestibili nello spazio digitale per mezzo dell'algoritmo di

modellizzazione –, che realizza tutte le sfumature possibili del metallo. La restituzione sonora di tali artifici, che si riattualizzano nel dominio del reale, riconfigurata mediante parametri fisici algoritmicamente definiti, rilegge, in veste nuova, le modalità stesse dell'ascoltare che gravitano nel *continuum*, carico di ambiguità, del fisicamente plausibile. A proposito, risulta particolarmente interessante la dichiarazione dell'autore che si dice essere sorpreso egli stesso delle possibilità offerte dal modello fisico: tali nuove possibilità ricadono, in parte, e in modo diretto, nelle articolazioni tecnico-gestuali della scrittura del quartetto – che vengono ridefinite mediante inedite configurazioni parametriche di scrittura –, e, in parte, rimangono proprie del circuito di produzione del suono digitale, confluendo nel suo tipico canale di comunicazione, il nastro magnetico. Tali esiti si organizzano in una interrelazione profonda, producendo una restituzione fenomenologica di un sistema che si dispiega all'insegna della complessità, costituita da fasi differenti, da differenti campi di prossimità nei quali diversi esiti e sfumature derivano dall'incontro, sempre nuovo, delle due polarità analogico/digitale e concreto/virtuale.

L'ibridazione dei due poli avviene con un linguaggio co-costruttore di realtà: il linguaggio che ne deriva rende possibile riformulare le intenzionalità, in un ideale interscambio che genera vincoli tra gli elementi del sistema, ma anche tra i diversi interlocutori dell'équipe di lavoro. Un incontro che traccia nuovi sentieri, laterali a quelli già battuti, ma possibili, riuscendo a dis-velare un modo nuovo di relazionarsi all'altro, come suggerito dal post-umanesimo, che, sulla scorta della concezione della tecnica non come semplice mezzo, ma come disvelamento, di Martin Heidegger,¹¹³ e delle tecnologie del sé di Michel Foucault,¹¹⁴ smantellano la separazione sé/alterità, attraverso un'ontologia relazionale post-dualistica in cui il 'cosa' corrisponde al 'come'.

Ciò che si disvela è, dunque, qualcosa che è *in nuce* nell'idea iniziale del compositore, e che si ridefinisce nell'incontro con il mondo della tecnologia. Lupone usa i modelli fisici per l'idea del metallo e per la ricerca di quelle particolari sonorità, in funzione dell'idea compositiva iniziale, un'idea che, evidentemente, è figlia del suo tempo, provenendo dalle possibilità offerte dalla tecnologia dell'oggi. Lo stesso poter

¹¹³ MARTIN HEIDEGGER, *La questione della tecnica* (1953), in Id., *Saggi e discorsi*, Mursia, Milano 1976, p. 9.

¹¹⁴ Cfr. MICHEL FOUCAULT, *Tecnologie del sé. Un seminario con Michel Foucault*, Bollati-Boringhieri, Torino 1992.

concepire tale idea, si potrebbe affermare che segua la circolarità ideale del rapporto scienza-arte, a cui lo stesso Lupone si richiama: si concepisce, dunque, ciò che l'attualità permette di concepire a livello ideativo, cioè idee e mezzi, che, in simbiosi, sono idealmente allineati:

Da alcuni anni la musica elettronica fa meno rumore, se ne parla sempre meno ed è raro incontrare musicisti e pubblicisti che ne parlino ancora col vocabolario avveniristico e ottimista degli anni Cinquanta e che l'assumano come vessillo avanguardista o come simbolo di liberazione dalla schiavitù dell'accademia strumentale. [...] La musica elettronica in un certo senso 'non esiste' più perché è dappertutto e fa parte del pensare musicale di tutti i giorni.¹¹⁵

Con queste parole, il compositore Luciano Berio, già nel lontano 1976, sanciva la maturità artistica della musica elettronica e l'ingresso della tecnologia nel bagaglio intellettuale di ogni compositore-artista contemporaneo. In tal senso, la tecnica non è da considerarsi come un qualcosa di esterno all'essere umano, bensì la funzione più propria e fisiologicamente inerente a sé stesso, in quanto esteriorizzazione del processo intellettuale, o, se si vuole, esteriorizzazione materiale del suo pensiero, scaturita dalla necessità dell'uomo di fronteggiare, agendo, l'ambiente circostante. In tal senso la tecnica si costituirebbe come l'unico vero piano di salvataggio dell'umano, in cui la protesi non è ausilio, bensì *passe-partout* per il raggiungimento di una nuova fase dell'evoluzione.¹¹⁶

Così, le articolazioni sonore del mondo virtuale, che si incontrano con quelle del mondo reale, non costituiscono una alterità contrastiva, ma danno vita ad una sorta di ibridazione che è metafora e segno dell'ibrido uomo-macchina. In tale contesto, la tecnica stessa può divenire l'occasione da cui può nascere l'inatteso fatto estetico, nel senso più profondo di una commistione tra sensi e intelletto. Quell'inatteso fatto estetico registrato dallo stesso Lupone, quando sottolinea che l'implementazione del modello fisico si è costituita attraverso una serie di rimandi e di aggiustamenti

¹¹⁵ LUCIANO BERIO, *Prefazione*, in *La musica elettronica*, a cura di Henri Pousseur, Feltrinelli, Milano 1976, p. VII.

¹¹⁶ Cfr. IDA DE DOMINICIS, *L'interiorizzazione della tecnica. Dal protesico all'estetico*, in *Limiti e confine del post-umano*, a cura di Giovanni Leghissa, Carlo Molinari Min, Carlo Salzani, «Lo Sguardo», XXIV (2017), pp. 127-141.

progressivi dettati dalle sorprese che di volta in volta gli esiti della modellizzazione provocavano su di lui e su tutta l'équipe tecnica, andando ben oltre il loro sistema di attese. Un incontro per mezzo del quale arte e tecnica, reale e virtuale, ibridandosi, producono nuove acquisizioni tanto in termini di conoscenza scientifica – scaturita dalla fantasia stessa dei ricercatori intenti alla costruzione di una soluzione tecnica per la realizzazione delle idee iniziali del compositore –, quanto in termini di allargamento del linguaggio artistico dell'opera, che acquisisce nuove articolazioni, e, nel contempo, nuove unità di significazione.

In tal senso, il linguaggio di Lupone, in *Corda di metallo*, si ridefinisce dal 'di dentro', costituendosi all'interno di una circolarità autentica di idea-tecnica-linguaggio. Un linguaggio che si espande a nuove articolazioni, a nuove sintassi che non sono lo specchio, bensì il risultato stesso di nuovi contenuti artistici ed intellettuali: le tecniche d'arco del brano, ad esempio, – già proiettate all'estensione e al superamento dei limiti del consueto – si proiettano verso gli spazi altri del digitale, ridefinendosi attraverso parametri fisici che esorbitano dai confini del linguaggio musicale consolidato, e che danno voce ad altri campi d'esperienza, tutti, a loro volta, ridefiniti in rapporto alle necessità estetiche.

Ne consegue, che non è tanto, né soltanto il modello che è esteso – secondo finalità esplorative e manipolative in cerca di nuove e inedite articolazioni timbriche –, bensì è il linguaggio stesso ad espandersi secondo nuove, emergenti esigenze di pensiero: le tecniche di modellizzazione impiegate da Lupone appaiono necessarie, così, all'inverarsi di un pensiero che accoglie la piena valenza estetica della tecnica in osmosi tra dimensione ideativa e dimensione della strumentalità.

Le articolazioni gestuali ottenute dallo studio del modello fisico, generatore di realtà, che ha ricadute nel reale – all'interno di un processo inverso al processo di virtualizzazione – pongono in dialogo il plausibile del virtuale con il tangibile degli strumenti fisici. E se all'interno del plausibile possono trovarsi differenti gradi di umanizzazione delle tecniche digitali, sia in riferimento a schemi noti (quelli 'umani' della tradizione) o ignoti (quelli delle ibridazioni e della totale astrazione), la ricaduta di tali articolazioni gestuali all'interno del linguaggio che è tanto forma, quanto contenuto, accoglie diversi gradi di virtualizzazione, un insieme di scartamenti il cui esito è la continua rinnovata e rinnovantesi costruzione di senso.

Se Lupone studia il modello fisico per raffinare e ridefinire scientificamente articolazioni inedite – che si integrano dialetticamente con le articolazioni esecutive estese, tipiche della scrittura contemporanea per quartetto –, mettendo il tutto al servizio di un’idea musicale ben definita, Kojs pare voler tornare ad una sorta di grado zero pre-linguistico, studiando il mondo fisico per estrapolare un ‘vocabolario’ di azioni, che fondi un linguaggio artistico capace di coniugare, *ab origine*, i due domini, quello fisico e quello virtuale. In tal senso, l’autore si muove esplicitamente all’interno di un approccio ecologico in cui il gesto incarnato – scaturito dall’interazione tra forme di azioni applicate agli oggetti e fenomeni dell’ambiente, tra esecutore e strumento – diviene il mezzo principale per un’espressione musicale che non esplora tanto le articolazioni tecnico-gestuali e strumentali del linguaggio culturalmente ratificato quanto, ad un livello precedente, il gesto, intenzionalmente espressivo, che crea linguaggio.

Partendo dalla natura stessa della modellizzazione fisica, che si costituisce nella formalizzazione dei meccanismi di produzione del suono, Kojs incentra la sua ricerca proprio sull’azione e, accoppiando agire fisico e agire simulato, crea uno spazio nuovo di articolazione fluida delle azioni fisiche e delle repliche virtuali che si espandono, si distorcono, oppure si sublimano in una sintassi del tutto astratta. Concentrandosi sull’azione, l’autore sposta l’attenzione dal modello alle condotte, o meglio, verso la relazione fra oggetti e azioni. L’oggetto musicale, infatti, non può essere definito prescindendo dalle condotte che lo costituiscono. Tale termine, preso a prestito dalle teorie psicologiche di matrice funzionalista, designa non dei semplici atti, bensì dei comportamenti orientati da una motivazione e da una finalità, in altre parole, le condotte sono atti intenzionali che possono essere osservati sia dal versante della produzione, sia da quello della ricezione.¹¹⁷ Infatti, è dalle esplorazioni senso-motorie, o senso-motorie simulate, del modello che scaturisce l’invenzione e lo sviluppo dell’idea musicale del compositore. Se nel mondo fisico l’attività di produzione del suono passa attraverso un’esperienza senso-motoria (seppur incarnata), capace di generare i gesti – quelle unità semantico-temporali che sono alla base della costruzione della forma –, così, nel virtuale, l’esplorazione gestuale (seppur incarnata e immaginata) diventa il

¹¹⁷ FRANÇOIS DELALANDE, *Le condotte musicali, Comportamenti e motivazioni del fare e ascoltare musica*, a cura di Giovanna Guardabasso e Luca Marconi, CLUEB, Bologna 1993.

termine da cui partire per costruire quelle unità sintattiche necessarie alla creazione del linguaggio.

All'interno di uno spazio unico dalle infinite potenzialità, in cui reale e virtuale interagiscono, il compositore sceglie i gesti, li espande nel tempo dell'invenzione, produce variazioni, anamorfismi, li astrae in entità del tutto nuove, sviluppando una produzione dagli esiti completamente inattesi.

Se è vero che il linguaggio musicale è un insieme di condotte umane utilizzate per esprimere, rappresentare o costruire forme sonore, è possibile leggere l'opera di Kojs come una sorta di meta-linguaggio che, ripartendo dai fondamenti della gestualità, privilegia l'esplorazione delle azioni performative, rispetto all'indagine di particolari parametri sonori, e i cui legami sintattici – tanto nel mondo fisico, quanto nel mondo virtuale – costruiscono un'espressività interamente basata sulle azioni.

Così, in *At and Across*, ad esempio, il linguaggio si costituisce in relazione ad una forma di simbolismo che non ha niente a che fare con il realismo acustico, bensì con una gestualità pre-linguistica scaturita dall'esplorazione e dall'investimento simbolico di una gestualità che diviene sintassi, e che si potrebbe idealmente collocare nel primo dei livelli di surrogazione codificati da Smalley. Se Lupone agisce all'interno dei livelli due e tre di surrogazione, tra, cioè, il socialmente ratificato e l'ambiguo, Kojs pare gravitare, invece tra il primo e il quarto livello: tra una gestualità archetipica non ancora propriamente musicale e una surrogazione remota in cui il legame con la fonte sonora, pur essendo del tutto ellittico, rimanda retroattivamente al primo livello. In Lupone, quindi, il linguaggio – nell'incontro tra il dominio del reale e il dominio del modello che genera il reale – è co-costruttore di realtà nella realizzazione di un'opera che si costituisce sull'ambiguo crinale del 'noto-non noto', mentre in Kojs, invece, essendo questi due domini che vengono articolati per costruire linguaggio, si agisce ad un livello precedente in un certo senso costitutivamente pre-linguistico, poiché sono i gesti, in quanto unità semantiche, dai quali scaturisce l'investimento simbolico di significato: l'idea compositiva.

Spostando il baricentro sull'azione, Kojs dà vita ad uno strumento ibrido analogico-digitale che è uno spazio fluido di sperimentazione da cui si innescano procedimenti compositivi che possono giungere ad articolare una forma che si costituisce nell'azione – come ad esempio in *Neither Stirred, Nor Shaken* –, e a dilatare il concetto stesso di

strumento che sia ampia ad includere, da un lato, gli oggetti della quotidianità e, dall'altro, ad inventare entità astratte che ridefiniscono la dinamica stessa del processo creativo, mettendola in dialogo con le frontiere dell'immaginazione per ricreare un mondo altro in cui lo strumento, ad esempio, può suonare lo strumentista.

Paradossalmente, da questa fluidità strumentale proviene la 'corporeizzazione' della musica: il corpo umano può entrare, infatti, nella partitura attraverso la rappresentazione delle sue trasfigurazioni astratte: le campane virtuali in *At and Across* si organizzano in una partitura in cui astrazione e incarnazione, reale e virtuale procedono di pari passo.

Analogamente costruita sul paradosso appare essere anche la poetica di Mauro Lanza, in cui i modelli fisici, collegandosi idealmente alla fragilità dei giocattoli musicali da lui stesso utilizzati, ne ereditano i limiti: ciò che custodisce *in nuce* potenzialità infinite viene delimitato attraverso una serie di vincoli di formalizzazione che ne provocano l'imperfezione e la marginalità. Vincoli derivanti da algoritmi modellizzati sulle strutture della linguistica generativa che costituiscono gli strumenti di un linguaggio che esorbita dai mezzi tradizionali di costruzione musicale e dalle stesse leggi della fisica, aprendosi, così, all'inatteso, a quell'inatteso già esplorato mediante l'uso di strumenti costitutivamente parassitari per sonorità, fattura e qualità.

Così, Lanza pare ripartire dal dominio del virtuale, uno spazio che gli consente di creare strumenti idiomati che gli permettono di innescare procedimenti di formalizzazione propri di quel mondo in grado di attraversare tutti i diversi materiali, tutti i diversi oggetti, che si interrelazionano dando vita ad una partitura complessa, che lega reale e virtuale in un oggetto unico. Se Kojs mette in relazione queste due dimensioni attraverso l'azione che crea linguaggio, Lanza, invece, è partendo dai linguaggi del virtuale che sperimenta la possibile convivenza delle due polarità: i procedimenti della composizione assistita a cui egli ricorre sia per la gestione dei modelli fisici, sia per gli strumenti e gli oggetti altri del suo vasto *instrumentarium*, costituiscono la strategia che rende possibile il dialogo profondo tra reale e virtuale.

L'organizzazione ritmica che deriva da tali procedimenti, ad esempio, investe la partitura, creando le espansioni impossibili del virtuale che si strutturano, *ab origine*, in una relazione formale con altri procedimenti più propriamente strumentali. Nei casi in cui l'impiego di strumenti acustici ricrei spettri di strumenti immaginari, la presenza del

modello virtuale è decisiva, poi, anche nella sua assenza. Ne deriva un concetto di allargamento dello strumento assolutamente radicale, assolutamente fluido e deterritorializzato, ancor più deterritorializzato, fluido e radicale dei casi che si sono precedentemente discussi. Emblematico, in tal senso, è l'esempio di Cadoz il quale attualizza, invece, il virtuale congiungendo, attraverso il ricorso a ricercati dispositivi di feedback sensoriali, l'astratto al reale.

I procedimenti algoritmici collocano Lanza, fin da subito, nella dimensione del virtuale, del non-umano, in cui la composizione musicale, in quanto processo, attraversa gli spazi di una individuazione impersonale e di una singolarità pre-individuale, e, nel contempo – avendo l'autore stesso lucidamente 'programmato' l'imperfezione dei modelli –, produce una resistenza che, paradossalmente ed inaspettatamente, reintroduce, nel virtuale, l'umano.

Laddove Lupone, ad esempio, consegue la riattualizzazione mediante il procedere di un confronto e di una ridefinizione progressiva delle tecniche strumentali, che si nutre delle possibilità del modello fisico e viceversa, in Lanza, invece, la riattualizzazione è inglobata nell'atto stesso della programmazione iniziale del modello e della sua messa in atto, cosicché virtualizzazione e riattualizzazione, incarnandosi, finiscono per coincidere. In tal senso, si potrebbe rifunzionalizzare la definizione di *physical thinking* in chiave di un pensare compositivo che implica fin da subito la ricaduta del virtuale nel reale.

I procedimenti di formalizzazione del modello fisico sono strategicamente, lucidamente progettati per far emergere l'impuro del mondo analogico dalla purezza del mondo digitale: parassiti deliberatamente programmati che danno vita all'inatteso, a quel 'side effect', che finisce per stupire il compositore stesso, e su cui si costituisce quel paradosso in virtù del quale processi altamente formalizzati producono dei risultati percettivi che si pongono al di là ed al di fuori dei sistemi di attese conosciuti e condivisi.

Così, tutti i materiali vengono contaminati in una sorta di moltiplicazione iper-estensiva: i suoni degli strumenti acustici, i suoni altri di oggetti improbabili della quotidianità insieme alle sonorità emergenti dei modelli stessi, pur mantenendo intatta la propria idiomaticità, convivono all'insegna di tale teatro dell'imperfezione. In tal senso, la poetica di Lanza potrebbe diatopicamente accostarsi, sebbene con modalità ovviamente proprie, a quella studiata proliferazione di oggetti, che contraddistingue

architettonicamente il tessuto stesso dell'estetica del Barocco, produttrice di meraviglia, un accostamento, questo, suggerito anche dall'uso di quest'ultimo termine in una sua opera, attraverso la mediazione della poesia di Amelia Rosselli.

Sembra, così, che il percorso di virtualizzazione, richiamato fin dall'esordio di questo paragrafo, come pure evocato anche nell'introduzione del presente capitolo, sia giunto a completezza, sebbene non attraverso un percorso lineare, bensì reticolare e circolare che pare richiamare la metafora del rizoma, elaborata da Deleuze, il quale a differenza degli alberi o delle loro radici, collega qualsiasi punto a qualsiasi altro punto, mettendo in gioco non solo regimi di segni molto diversi, ma anche statuti di stati di cose.¹¹⁸ Il rizoma sorge, dunque, senza centro né gerarchia, essendo deterritorializzato come una mappa, che può essere riconfigurata in base al punto focale e al punto di vista di una contemplazione individuale.

Così i modelli fisici si inseriscono, all'interno della produzione esaminata, nei diversi luoghi possibili dei processi della creazione, secondo questa rizomatica molteplicità costituita dall'insorgere di direzioni diverse, con rimbalzi inaspettati, configurazioni consuete e altre meno prevedibili, dando origine a nuove articolazioni, nuove sintassi e nuovi parametri che arricchiscono e/o ridefiniscono i linguaggi, fino ad arrivare a procedimenti propri del dominio digitale che impegnano gli autori in soluzioni inedite. La molteplicità e la multidirezionalità dei percorsi possibili pare essere, dunque, la cifra che contraddistingue questa produzione, la quale – nei numerosi esempi incontrati, e, ancor più nella visione dettagliata dei tre casi di studio – testimonia di quanto tali tecniche siano state pienamente assimilate nel *know how* dei compositori.

¹¹⁸ GILLES DELEUZE – FÉLIX GUATTARI, *Millepiani. Capitalismo e schizofrenia*, Castelveccchi, Roma 2003, p. 39.

Conclusioni generali

Partendo dallo studio delle tecniche di modellizzazione si è cercato di delineare, mediante le differenti prospettive di osservazione adottate nel corso del presente lavoro – e, segnatamente, l’elaborazione del modello e della sua ricaduta performativa, fino al suo costituirsi in linguaggio –, come i diversi modelli di rappresentazione della sorgente sonora abbiano dischiuso un ambito artistico peculiare, costituendo una variegata liuteria virtuale dalle feconde potenzialità creative. Una liuteria, in continua innovazione e ridefinizione, che ha avviato la sperimentazione di nuovi assetti performativi, spostando l’asse della ricerca artistica in ambito elettroacustico dal suono alla esplorazione compositiva degli strumenti/oggetti virtuali e delle gestualità, fino alla elaborazione di un vero e proprio *physical thinking* fondato su concetti fisici, quali energia, onde, movimento, forza, etc.: un *paradigm shift* che presuppone una disposizione mentale del tutto nuova, che sappia farsi terreno d’incontro di campi d’esperienza anche molto distanti dalle competenze artistiche consuete, prerogativa irrinunciabile per un efficace, autentico e strutturale impiego dei modelli nel processo compositivo.

La letteratura esaminata ripercorre un arco temporale che va dalle prime sperimentazioni degli anni Settanta fino all’analisi di alcuni esempi che arrivano alle soglie dell’oggi, cercando, in tal modo, di testimoniare quelle fasi più marcatamente identitarie e rappresentative dell’evolversi delle tecniche di modellizzazione. In tal senso, il focus è stato mantenuto sul periodo centrale del lasso cronologico scelto/individuato, che vede un fiorire di iniziative sinergiche, con équipes multidisciplinari – costituite da informatici, ingegneri, compositori, musicisti e fisici – coinvolte nello sviluppo delle tecniche e nella esplorazione della loro ricaduta sui processi compositivi. È opportuno, infatti, sottolineare come i più significativi usi della modellizzazione in ambito artistico, provengano ancora da ambiti di ricerca artistico-scientifica che coinvolgono professionalità diverse in sinergica intesa, sebbene, con l’avvento di nuove potenzialità e di nuove interrelazioni hardware/software, anche singoli compositori, dotati di approfondite competenze informatiche, hanno potuto offrire originali contributi al loro sviluppo.

Nel complesso, però, le implementazioni dei modelli negli ambienti di programmazione più generali, mediante librerie o anche il STK, se, da un lato, hanno favorito il diffondersi dell'uso di tali tecniche nelle pratiche compositive, dall'altro, ne hanno inibito, almeno parzialmente, lo sviluppo personalizzato. Tali implementazioni, nel corso dell'ultimo ventennio, si sono ramificate, intrecciate, innestate e confuse nella proliferazione dei percorsi possibili all'interno degli attuali ambienti informatici – esemplare in tal senso il linguaggio FAUST – cosicché il loro impiego negli ambiti della creazione appare oggi più fluido, nel contesto di processi di sintesi e di elaborazione sempre più interrelati e in continua evoluzione.

Il repertorio esaminato ha testimoniato un ampio e assai variegato campionario di modelli, di contesti performativi e di elaborazioni linguistico-formali che, nel loro insieme, hanno esaurientemente risposto agli interrogativi iniziali di questa ricerca: i modelli fisici, o se vogliamo gli strumenti virtuali fisicamente informati, hanno costruito un proprio vocabolario, vocabolario che è entrato nella ricerca artistico-musicale odierna generando nuovi ambiti di espressività e nuove forme di articolazione dei diversi linguaggi.

Il corpus della letteratura esaminata ha efficacemente dimostrato la grande varietà dei modelli e degli esiti conseguiti: dall'approccio per guida d'onda finalizzato a comprendere, in primo luogo, la meccanica della realtà sonora esistente, per poi procedere ad una sua alterazione; al percorso idealmente opposto di una tecnica, quale quella d'interazione di massa che, molto più predisposta ad un immediato uso creativo nel virtuale, risulta, inversamente, di assai più complesso utilizzo laddove la si voglia applicare alla riproduzione di oggetti esistenti. Due tendenze che, polarizzando esiti opposti, testimoniano della interrelazione dialettica che si crea tra concettualizzazione del modello, che rappresenta un'astrazione selettiva della realtà, e creazione artistica, che si struttura anche in rapporto alle caratteristiche ontologiche dell'oggetto/strumento con il quale è chiamata ad interagire.

Un nesso che si è cercato di testimoniare ricostruendo un quadro d'insieme il più possibile compiuto, pur nella consapevolezza che ancora molto rimane da indagare e da comprendere sul rapporto tanto complesso quanto in continua esorbitante evoluzione di tecnica e creatività, senza contare che le tecniche, le pratiche e le progettualità studiate possono essere lette nel più ampio contesto delle realtà virtuali che ampliano

e trasformano il nostro modo di esperire il mondo, aprendo a spazi e rapporti tutti da vivere e da esplorare.

Allargando lo sguardo, è possibile osservare che quanto è stato fatto, anche solo nell'ambito della creatività musicale, può costituire un frammento di ciò che in futuro sarà possibile fare: le tecniche di modellizzazione fisica in ambito musicale non hanno, ancora, raggiunto la loro piena maturità, né hanno pienamente dimostrato la loro invasività nei più diversi domini della realtà virtuale. Le esperienze, di questi ultimi anni, infatti, hanno appena prefigurato i possibili sviluppi dell'interazione uomo-macchina che potranno costituirsi ad oggetto delle future pratiche musicali. In ogni caso, ogni aspetto analizzato non può che inquadrarsi nel più ampio contesto delle pratiche della realtà virtuale, le quali contraddistinguono, in maniera identitaria e in continua ridefinizione, il pensiero, le conoscenze e la creatività della contemporaneità.

Appendice al cap. II

Repertorio delle composizioni create con strumenti virtuali attraverso la sintesi per modelli fisici

Il presente database – che contiene informazioni precise sulla metodologia di sintesi usata per ciascuna composizione, sulla tipologia di strumento modellizzato, e sull’organico – è l’ideale prosecuzione di un primo tentativo di censimento prodotto da Juraj Kojs, il quale, nella sua tesi di dottorato, ha iniziato a catalogare un corpus di composizioni che usano i modelli fisici, fino al 2008.¹ Ovviamente, per i limiti intrinseci della catalogazione di un repertorio che, parallelamente all’evolversi delle tecniche e allo loro sempre più facile implementazione anche in ambienti non istituzionali, o, inversamente, per la sperimentazione in continuo divenire presso centri di ricerca quali ad esempio ACROE, CCRMA e IRCAM, diviene sempre più fluido e difficilmente tracciabile, la natura di tale censimento è più di natura rappresentativa che esaustiva.

¹ JURAJ KOJS, *Cyberactions and Cyberinstruments via Physical Modeling Synthesis: Extending Musical Realities*, Ph. D thesis, University of Virginia 2008.

Anno	Compositore	Titolo	Organico	Strumento/oggetto o virtuale	Tipologia di strumento virtuale	Approccio della modellizzazione fisica	Ambiente d'implementazione e progettista
1960	MAX MATHEWS	<i>Bicycle Built for Two</i>	nastro stereofonico	tratto vocale	estesio	algoritmo Kelly-Lochbaum	Kelly-Lochbaum
1980	DAVID A. JAFFE	<i>May All Your Children Be Acrobats</i>	mezzosoprano, otto chitarre e nastro stereofonico	corda pizzicata	estesio	algoritmo Karplus-Strong	Smith-Jaffe; impl. Jaffe
1982	DAVID A. JAFFE	<i>Silicon Valley Breakdown</i>	nastro quadrifonico	corda pizzicata	estesio	algoritmo Karplus-Strong esteso	Smith-Jaffe; impl. Jaffe
1985	DAVID A. JAFFE	<i>Telegram To The President</i>	quartetto d'archi e elettronica	corda pizzicata	estesio	algoritmo Karplus-Strong esteso	Smith-Jaffe; impl. Jaffe
1986	DAVID A. JAFFE	<i>The Fishing Trip</i>	12 voci maschili e nastro stereofonico	corda pizzicata, marimba	estesio	algoritmo Karplus-Strong esteso, sintesi modale	Smith-Jaffe; Jaffe, imp. Serra
1987	DAVID A. JAFFE	<i>Grass</i>	voci e nastro stereofonico	corda ad arco	estesio	algoritmo Karplus-Strong esteso	Smith-Jaffe; impl. Jaffe
1991	CHRIS CHAFE	<i>El Zorro</i>	tromba e elettronica	tromba e ottoni	estesio	guida d'onda 1-D	Cook
1992	KAJIA SAARIAHO	<i>Amers</i>	violoncello solo e orchestra	campane e percussioni	estesio	sintesi modale	Mosaic
1993	CLAUDE CADOZ	<i>Esquisses</i>	musica e immagini animate	modelli astratti	astratto	interazione di massa	Cordis-Anima Software
1993-1994	PAUL LANSKY	<i>Still Time</i>	nastro stereofonico	flauto	estesio	guida d'onda 1-D	Ein; Garton, Cook, Lansky

1994	FRANÇOIS NICOLAS	<i>Dans la distance</i>	per mezzosoprano, baritono, ensemble ed elettronica	corde pizzicate e percussioni	esteso e ibrido	sintesi modale	Mosaic; Cort Lippe
1995	CHRIS CHAFE	<i>Push Pull</i>	celletto solo e live electronics	corda ad arco	esteso	algoritmo McIntyre- Schumacher-Woodhouse	workstation NeXT; Chafe, Mattheus
1995- 1996	CHRIS CHAFE	<i>Arcology</i>	celletto e disklavier	corda ad arco	esteso	guida d'onda 1-D	workstation NeXT, con Yamaha VL-1.
1997	ACHIM BORNHOEFT	<i>Virtual String</i>	nastro stereofonico	corda ad arco	esteso	guida d'onda 1-D	Workstation Silicon Graphics con l'applicazione in tempo reale "vstring" (Michael Kurz)
1997	PAUL LANSKY	<i>Things She Carried</i>	nastro stereofonico	chitarra elettrica pizzicata	esteso	algoritmo Karplus-Strong esteso	Sullivan
1997	GUILLAUME LOIZILLON	<i>Fleurs et insectes</i>	poesia sonora, per voce e elettronica	tastiere sonore, gong, piatti, 'rimbalzi'	ibrido	sintesi modale	Modalys, Loizillon
1997	GUILLAUME LOIZILLON	<i>L'ivresse est un nombre</i>	flauto, clarinetto e elettronica	piastre	ibrido	sintesi modale	Modalys, Loizillon
1997	MICHELANGELO LUPONE	<i>Corda di Metallo</i>	quartetto d'archi e elettronica	corda ad arco	esteso	algoritmo Hiller-Ruiz	Palumbi-Seno
1997	JUAN REYES	<i>Straw-berri</i>	nastro stereofonico	flauto e corda pizzicata	esteso	guida d'onda 1-D	STK; Cook-Scavone
1998	TORSTEN BELSCHNER	<i>SonoMorphis</i>	installazione audio-video	corda ad arco e tubo soffiato	esteso	guida d'onda 1-D	Yamaha VL70-m
1998	LUDGER BRÜMMER	<i>Trill>1</i>	nastro a 4 canali	strutture astratte	esteso	interazione di massa	Genesis

1998	MICHELANGELO LUPONE	<i>Canto di Madre</i>	nastro stereofonico	corda ad arco	esteso	algoritmo Hiller-Ruiz	Palumbi-Seno
1998	HANS-PETER STUBBE TEGLBIÆRG	<i>Rhizome</i>	arpa e live electronics	strutture astratte con sonorità di fenomeni naturali	astratto	interazione di massa	Genesis
1999	LUDGER BRÜMMER/ SILKE BRAEMER	<i>"Le temps s'ouvre" (Thrill)</i>	video e fixed-media a 4 canali	strutture astratte (vedi sopra)	astratto	interazione di massa	Genesis
1999	LUDGER BRÜMMER	<i>Thrill</i>	fixed-media	5 oggetti vibranti con 7 masse all'incirca, che producono vibrazioni con frequenze individuali	astratto	interazione di massa	Genesis
1999	CHRIS CHAFE	<i>Transect</i>	violoncello e elettronica	corda ad arco e tratto vocale	esteso	algoritmo McIntyre-Schumacher-Woodhouse	Sintesi del modello fisico in C++: Sintetizzatore software Reality di Seer Systems (personalizzato); Chafe
1999	GIUSEPPE GAVAZZA	<i>La natura delle cose</i>	percussioni e suoni di sintesi a 4 canali	strutture astratte	astratto	interazione di massa	Genesis 1.4
1999	DAN TRUEMAN	<i>Lobster Quadrille</i>	suoni di sintesi su nastro	campane a vento di bambù	esteso	STK (algoritmo PhiSEM)	Max/MSP; P. Cook
1999	HANS TUTSCHKU	<i>Eikasia</i>	nastro a 8 canali	piastre circolari e rettangolari e corda grave di pianoforte	ibrido	sintesi modale	Modalys; H. Tutschku
1999/2	HANS-PETER STUBBE	<i>Rhizome II</i>	nastro stereofonico	strutture astratte con sonorità di	astratto	interazione di massa	Genesis

000	TEGLBI/ERG			fenomeni naturali				
1999-2001	MAURO LANZA	<i>Erba nera che cresci segno nero tu vivi</i>	soprano e fixed media	percussioni (set di gamelan)	esteso e ibrido	sintesi modale		Modaly; M. Lanza
2000	MATTHEW BURTNER	<i>S-Trance-S</i>	meta-sassofono e elettronica	corda ad arco	esteso/ibrido	algoritmo a guida d'onda		Max/MSP; Serafin
2000	HANS TUTSCHKU	<i>Resorption-Coupure</i>	nastro a 4 canali	strutture ad arco e percosse	astratto	interazione di massa		Genesis; H. Tutschku
2001	LUDGER BRUMMER	<i>Medusa</i>	percussioni e suoni di sintesi	struttura astratta	astratto	interazione di massa		Genesis
2001	MATTHEW BURTNER	<i>S-Trance-S</i>	meta-sassofono e elettronica	corda ad arco, ExBow_Metasax	esteso/ibrido	guida d'onda 1-D		Max/MSP; Serafin
2001	CHRIS CHAFE	<i>Oxygen Flute</i>	installazione interattiva in tempo reale	flauti archeologici cinesi di bambù	esteso	1-D guida d'onda		C++; C. Chafe, Greg Niemeyer
2001	CHRIS CHAFE	<i>Ping</i>	installazione su network di rete	serie di corde pizzicate	esteso	1-D guida d'onda		C++; C. Chafe
2001	Vafa DADACHOVA	<i>Eks</i>	orchestra e suoni di sintesi	struttura astratta	astratto	interazione di massa		Genesis
2001	KONSTANTINOS P. DOUVITSAS	<i>Three songs</i>	voce, percussioni, pianoforte e suoni di sintesi	struttura astratta	astratto	interazione di massa		Genesis
2001	GIUSEPPE GAVAZZA	<i>Variazioni su un Preludio di Skrjabin</i>	disklavier e suoni di sintesi amplificati dentro il pianoforte	corde del pianoforte	esteso	interazione di massa		Max/MSP, Genesis

2001	DAVID A. JAFFE	<i>Racing Against Time</i>	due violini, due sassofoni, piano, radio-drum (Mathews)	motori di auto, aerei a reazione, etc.	estesio	algoritmo Karplus-Strong estesio	Smith-Jaffe; soundMax, SynthCore; imp. Jaffe, Stilson-Costello, <i>et al.</i>
2001	MAURO LANZA	<i>Aschenblume</i>	per nove strumenti acustici: flauto, clarinetto, pianoforte, 2 set di percussioni, violino, viola, violoncello e contrabbasso.	materiale armonico derivante dall'analisi di due spettri di placche circolari.		sintesi modale	Modalys; M. Lanza
2001	MAURO LANZA	<i>Burger Time ou les Tentations de St. Antoine</i>	per tuba e elettronica a 8 canali	percussioni e oggetti vari che richiamano 'glockenspiel', 'campanelli', 'allarmi', etc.	estesio e ibrido	sintesi modale	Modalys; Lanza
2001	MESIAS MAIGUASHCA	<i>Tiefen</i>	nastro con soli suoni di sintesi a 8 canali	struttura astratta	astratto	interazione di massa	Genesis; P. Duttillieux, Maiguashca
2001	ARNAUD PETIT	<i>Song from Waves</i>	voce e suoni di sintesi	struttura astratta	astratto	interazione di massa	Genesis
2001	JUAN REYES	<i>ppP</i>	piano e elettronica	pianoforte	estesio	1-D guida d'onda	Common Lisp Music; J. Reyes
2001	JUAN REYES	<i>Wadi Musa</i>	quenas (flauti andini), violoncello e elettronica	maraca, clarinetto	estesio	algoritmo PhiSEM;	Common Lisp Music; modellizzato da Cook; Reyes STK estesio; Cook-Scavone; Reyes
2001	ARNAUD PETIT	<i>Song from Waves</i>	voce e suoni di sintesi	struttura astratta	astratto	interazione di massa	Genesis
2001	HANS TUTSCHKU	<i>Memory - fragmentation</i>	nastro a 8 canali	corde pizzicate e strumenti a pelle			

2002	MATTHEW BURTNER	<i>S-Morphe-S</i>	metasassofono e elettronica	campana tibetana	esteso	guida d'onda a bande	Max/MSP; Serafin
2002	CLAUDE CADOZ	<i>pico..TERA</i>	nastro quadrifonico	'strutture', 'esecutori' e 'direttori' virtuali	astratto	algoritmo massa-molla	GENESIS; Cadoz
2002	TED COFFEY	<i>Twice Twice</i>	cymbalom e nastro stereofonico	barra di percussioni sfregata con l'arco	esteso	guida d'onda a bande	Max/MSP PerRColate; Essl-Cook
2002	MAURO LANZA	<i>The skin of the onion</i>	flauto, clarinetto, , violino, violoncello percussioni e pianoforte	materiale armonico derivante dall'analisi di spettri di placche (circolari e quadrate) e barre di marimba	esteso e ibrido	sintesi modale	Modalys
2002	GARY SCAVONE	<i>Air Study I</i>	sassofono contralto e nastro stereofonico	due corde 'soffiate' da ancia di sassodono	ibrido	guida d'onda 1-D	STK; Scavone
2003	CHRIS BURNS	<i>Hero and Leander</i>	nastro multicanale	feedback network		guida d'onda a bande	Pd networks; Burns
2003	GIUSEPPE GAVAZZA	<i>Sciamano</i>	suoni di sintesi a otto canali	strutture astratte	astratto	interazione di massa	Genesis
2003	JURAJ KOJS	<i>Garden of Dragon</i>	cellofan amplificato, tubi corrugati in plastica e elettronica	tubi corrugati virtuali	esteso	guida d'onda 1-D	Max/MSP; S. Serafin
2003	GARY SCAVONE	<i>Pipe Dream</i>	MIDI wind controller (<i>The Pipe</i>) e sintesi in tempo reale con diffusione a 4	sassofoni virtuali	esteso	guida d'onda a bande	Synthesis ToolKit in C++.

				canali						
2003-2004	JUAN REYES	<i>Freddie the Friedlander</i>		nastro multicanale	corde sfregate e pizzicate	esteso		guida d'onda 1-D		Common Lisp Music; Reyes
2004	MATTHEW BURTNER	<i>That Which is Bodiless Is Reflected in Bodies</i>		nastro a 8 canali	campana tibetana	esteso		guida d'onda a bande		Max/MSP; Serafin
2004	TED COFFEY	<i>Armonica Lullabies</i>		nastro stereofonico	armonica a bicchieri	esteso		guida d'onda a bande		Essl
2004	TED COFFEY	<i>Untitled (Koans)</i>		voce, sassofono contralto, nastro stereofonico e animazione	armonica a bicchieri	esteso		guida d'onda a bande		Essl
2004	JURAJ KOJS	<i>Three Movements</i>		pianoforte e elettronica	corda ad arco	esteso		guida d'onda 1-D		Max/MSP; S. Serafin
2004	MAURO LANZA	<i>Le Songe de Médée</i> (musica per un balletto di A. Preljocaj)		flauto, clarinetto, trombone, violino, viola, violoncello, contrabbasso, pianoforte, percussioni e nastro a 4 canali	Percussioni, tubi usati come filtri	esteso e ibrido		sintesi modale		Modalys; Lanza
2004	ANDREW SCHLOSS	<i>Can You Hear the Shape of a Drum?</i>		radio-drum	tamburo			sintesi modale		Max/MSP; Andrew Schloss
2005	MATTHEW BURTNER	<i>Windskeetch</i>		meta-sassofono e qualsiasi altro strumento	strumento a fiato	esteso		guida d'onda a bande		Max/MSP; Burtner
2005	CHRIS CHAFE	<i>Replication</i>		pianoforte e dvd	corda pizzicata			guida d'onda 1-D		C++; Chafe
2005	Ted Coffey	<i>Armonica Lullabies</i>		installazione sonora per	armonica a	esteso		guida d'onda a bande		Essl

		No. 2	nastro quadrifonico	bicchieri				
2005	TED COFFEY	<i>Music for Lawn Games N. 3</i>	installazione sonora all'aperto per sei altoparlanti parabolici riflettenti e 'giochi da prato'	armonica a bicchieri	esteso		guida d'onda a bande	Essl
2005	TED COFFEY	<i>Nonlinear Ambient Music</i>	nastro stereofonico mixato dal vivo e danzatori	blotar: combinazione di flauto con chitarra elettrica	ibrido		guida d'onda 1-D	Max/MSP; D. Trueman
2005	JURAJ KOJS	<i>Revelations</i>	giocattoli circolari, piastre risonanti e elettronica	barra di percussioni sfregata con l'arco	esteso		guida d'onda 1-D	Max/MSP- PerRColate; Georg Essl and Perry Cook; D. Trueman and L. Dubois impl.
				shakers virtuali			PhiSEM	Max/MSP- PerRColate; Perry Cook; D. Trueman and L. Dubois impl.
				corda ad arco			guida d'onda 1-D	Max/MSP; S. Serafin
2005 (ante quem)	DAN TRUEMAN	<i>Improvisation</i>	improvvisazione live	Blotar: flauto, chitarra elettrica	ibrido		guida d'onda 1-D	Max/MSP; Trueman
2005 (ante quem)	DAN TRUEMAN	<i>Wind in Hands, Water in Feet</i>	danza e elettronica	campane a vento cinesi	esteso		algoritmo PhiSEM	Max/MSP; Cook
2005-2006	MAURO LANZA	<i>I funerali dell'anarchico Passannante</i>	coro ed elettronica	oggetti percussivi con modi aleatori. Masse controllate a velocità audio con risuonatori			sintesi modale	Modalys; M. Lanza Max/MSP: PerRColate

					ibridi							
2006	CHRIS CHAFE	<i>Scatter</i>		soprano e dvd		corda pizzicata			guida d'onda 1-D		C++; Chafe	
2006	TED COFFEY	<i>Never Ate So Many Stars</i>		nastro stereofonico		armonica a bicchieri			guida d'onda a bande		Essl	
2006	JURAJ KOJS	<i>Air</i>		fujara e elettronica		fujara	esteso		guida d'onda 1-D		Max/MSP; S. Serafin	
2006 (rev. 2013)	JURAJ KOJS	<i>All Forgotten</i>		piano e elettronica		marimba	esteso		sintesi modale		Max/MSP; S. Serafin	
2006 (rev. 2013)	JURAJ KOJS	<i>Concealed</i>		flauto e elettronica		flauto	esteso		guida d'onda 1-D		Max/MSP- PeRColate; Model di P. Cook; impl. D. Trueman e L. Dubois	
2006	JURAJ KOJS	<i>In Secret</i>		oboe e elettronica		campana tibetana	esteso		guida d'onda 1-D		Max/MSP; S. Serafin	
2006 (rev. 2013)	JURAJ KOJS	<i>To Where He Waited</i>		violoncello e elettronica		membrane virtuali	esteso		rete digitale 2-D a guida d'onda		Max/MSP- PeRColate; Julius Smith e Gary Scavone; impl. D. Trueman	
2006	PAUL LANSKY	<i>A Guy Walks into a Modal Bar</i>		nastro a 8 canali		barra di percussioni	esteso		sintesi modale		STK; modelli di Cook-Scavone; ported to SuperCollider3 by Lansky	
2006	PAUL LANSKY	<i>Composition Project for</i>		nastro stereofonico		barra di percussioni	esteso		sintesi modale		STK; modelli di Cook-Scavone; ported to SuperCollider3 by Lansky	

2006	PAUL LANSKY	<i>On F</i>	nastro stereofonico	clarinetto, mandolino, sassofono	esteso	guida d'onda 1-D	STK; modelli di Cook-Scavone; ported to SuperCollider3 by Lansky
2006	MAURO LANZA	<i>104</i>	nastro stereofonico	percussioni, masse controllate a velocità audio con risuonatori ibridi	esteso e ibrido	sintesi modale	Modalsys; Lanza
2006	JUAN REYES	<i>Fuxing</i>	nastro multicanale	marimba 'soffiata' e vibraphone	esteso	guida d'onda a bande	Common Lisp Music; Reyes
2007	TORSTEN BELSCHNER	<i>Sono reMorphed</i>	installazione audio-video interattiva e immersiva a 43 canali	corda ad arco e tubo soffiato	esteso	guida d'onda 1-D	Yamaha VL70-m
2007	LUDGER BRÜMMER	<i>Shine</i>	fixed media, video, danzatori e laser opzionali	modellazione di gesti per l'interazione audio/video		interazione di massa	Genesis, Mimesis.
2007	CLAUDE CADOZ	<i>Gaea</i>	nastro quadrifonico	strumenti percussivi, fenomeni ambientali, 'esecutori', 'direttori' e 'forme' virtuali	astratto	interazione di massa	Genesis; C. Cadoz
2007	CHRIS CHAFE	<i>Score IV</i>	radio baton e elettronica	bugle, corda, sassofono, tratto vocale		guida d'onda 1-D	C++; Chafe
2007	CHRIS CHAFE	<i>Tomato Music</i>	computer generated sound	organo idraulico		guida d'onda 1-D	C++; Chafe
2007	CHRIS CHAFE	<i>Tomato Quintet</i>	installazione	organo idraulico, corda di pianoforte		guida d'onda 1-D	C++; Chafe
2007	TED COFFEY	<i>Lullabies & Protest Songs: Suite No. 1</i>	voce, quintetto di chitarre, percussioni, contrabbasso, strumenti 'trovati' e	armonica a bicchieri	esteso	guida d'onda a bande	Essl

2007	CHIMIN HSIEH, SEAN FERGUSON & ANNIE LUCIANI	<i>Miroirs</i>	performance mista per coreografia reale e virtuale, violoncello e elettronica	corpi e movimenti virtuali	astratto	interazione di massa	Genesis
2007	MAURO LANZA	<i>Descrizione del diluvio</i>	opera multimediale realizzata in collaborazione con Paolo Pachini per sei voci, sei percussionisti, elettronica e proiezione di video su 8 schermi	percussioni (set di gamelan); placche geometricamente simmetriche (rettangolari e circolari) con interpolazioni	esteso e ibrido	sintesi modale	Modalys
2007	MAURO LANZA	<i>Vesperbild</i>	ensemble strumentale misto da 5 a 9 strumenti, strumenti giocattolo e elettronica	Percussioni e tubi usati come filtri	esteso e ibrido	sintesi modale	Modalys; Lanza
2007	FRANÇOIS POYER	<i>Aion Chryseon</i>	suoni di sintesi	<i>Serpent</i> con corde sfregate macro- temporali	astratto	interazione di massa	Genesis
2007	OLIVIER TACHÉ	<i>Utsikten</i>	fixed media	strutture astratte: <i>respirations;</i> <i>condensacorde</i>	astratto	interazione di massa	Genesis; Olivier Tache
2007	HANS-PETER STUBBE TEGLBIÆRG	<i>Regime_S</i>	fixed media a 8 canali	strutture astratte	astratto	interazione di massa	Genesis
2008	JURAJ KOJS	<i>E-clip-sing</i>	clarinetto amplificato, chitarra, violoncello, contrabbasso ed elettronica	strutture ibride: <i>Buiara, Psychopsis</i> e <i>Odontocidium</i>	ibridi	sintesi modale	Tassman, Kojs
2008	MAURO LANZA	<i>Burger Time ou les Tentations de St. Antoine</i> (seconda versione)	fixed media	percussioni e oggetti vari che richiamano 'glockenspiel', 'campanelli',	esteso e ibrido	sintesi modale	Modalys; Lanza

				'allarmi', etc. masse controllate a velocità audio con risuonatori ibridi (prendono il posto del basso tuba)		estesi		sintesi modale		Modalys in tempo reale. Lorenzo Pagliei
2008	LORENZO PAGLIEI	<i>L'Apparente</i>	percussionista/mimo, due percussionisti di oggetti, violoncello, tromba e live electronics	strutture vibranti di diverse dimensioni e materiali che espandono gli archetipi strumentali dell'ensemble utilizzato: corde, archetti, placche, membrane, gong e tubi						
2008	HANS-PETER STUBBE TEGLBIÆRG	<i>Kobar Qunar II</i>	clarinetto ed elettronica	clarinetto		esteso		sintesi modale		Modalys
2009	NOÉ GUIRAND	<i>Somnambule</i>	strumento audio-video	marionette virtuali				interazione di massa		Genesis, Mimesis; Kevin Sillam
2009	MAURO LANZA	<i>da #9</i>		materiale armonico derivante dall'analisi di spettri di placche (circolari e quadrate) e barre di marimba				sintesi modale		Modalys

2009	HANS-PETER STUBBE TEGLBI/ÆRG	<i>Rippled Reeds</i>	clarinetto basso e electronica	clarinetto basso per multifonici	esteso	sintesi modale	Modalys; Thomas Goepper
2010	CLAUDE CADOZ	<i>Lamer</i>	fixed media stereofonico	modello di carillon	astratto	interazione di massa	Genesis
2010	GIORGIO KLAUER	<i>Doppelgänger</i>	pianoforte (due esecutori) ed elettronica	modello di corda alle differenze finite	esteso	interazione di massa	Cordis-Anima; Genesis; SuperCollider, impl. Klauer
2010	JURAJ KOJS	<i>Re-route</i>	clarinetto e elettronica	modello di clarinetto		guida d'onda	Percolate
2010	JURAJ KOJS	<i>The Wetland</i>	violoncello e elettronica	corda pizzicata		algoritmo Karplus-Strong	Kojs impl.
2011	MAURO LANZA	<i>Le Nubi non Scoppiano per il Peso</i>	per 9 musicisti, soprano, gocce d'acqua controllate dal computer ed elettronica	Tubi (ibridi) usati come filtri	ibrido	sintesi modale	Modalys
2013	MAURO LANZA	<i>Ludus de morte regis</i>	per 28 cantanti ed elettronica	Risuonatori (placche rettangolari di vetro). Masse controllate a velocità audio con risuonatori ibridi	esteso e ibrido	sintesi modale	Modalys
2013	GIUSEPPE GAVAZZA	<i>Chordis cordi vibrat</i>	suoni di sintesi a 4 canali	strutture astratte	astratto	interazione di massa	Genesis

2013	LORENZO PAGLIEI	<i>Voir-Toucher</i>	tre 'superfici di controllo dei gesti' (Geecos – Gesture Control Surfaces), un kinect e sintesi modale in tempo reale	gesti archetipici su corde, archetti, placche, membrane e tubi, clarinetto, flauto.	esteso e ibrido	sintesi modale	Modalys in tempo reale: Lorenzo Bianchi e Lorenzo Pagliei
2014	LORENZO PAGLIEI	<i>Artefatti II</i>	solo improvvisativo con <i>Olpe (Geecos)</i> e sintesi modale in tempo reale	quattro strati di sintesi sonora: - risuonatore eccitato tramite forza: tubo, placca, membrana; - placche percosse (modellizzazione della percussione del feltro del pianoforte); - modello arco corda; - un tubo che simula un flauto/clarinetto	esteso e ibrido	sintesi modale	Modalys in tempo reale. Lorenzo Pagliei
2014	LORENZO PAGLIEI	<i>Artefatti III</i>	solo improvvisativo con <i>Manta (Geecos)</i> , un kinect e sintesi sonora in tempo reale	quattro strati di sintesi sonora, come in <i>Artefatti II</i> (2014)	esteso e ibrido	sintesi modale	Modalys in tempo reale. Lorenzo Pagliei
2014	LORENZO PAGLIEI	<i>Ricerare</i>	Solo per <i>Leudo (Geecos)</i> e sintesi modale in tempo reale	quattro strati di sintesi sonora, come in <i>Artefatti II</i> (2014)	esteso e ibrido	sintesi modale	Modalys in tempo reale. Lorenzo Pagliei
2015	MIGUEL AZGUIME	<i>En Gène Engin Ni Gemme</i>	ensemble da camera e elettronica			interazione di massa	Genesis

2015	CLAUDE CADOZ	<i>Hélíos</i>	suoni di sintesi	strutture astratte	astratto	interazione di massa	Genesis – TGR – Hélicanthe: Cadoz
2015	GIUSEPPE GAVAZZA	<i>Le voci del mondo</i>	orchestra di 24 altoparlanti	strutture astratte indipendenti ciascuna costituita da un diverso 'musicista' Genesis	astratto	interazione di massa	Genesis
2015	GIUSEPPE GAVAZZA	<i>Musica ritrovata</i>	per 5 musicisti reali e 5 'musicisti' Genesis	strutture astratte	astratto	interazione di massa	Genesis
2016/ 2018	MARCO STROPPA	<i>Come play with me</i>	'totem acustico' di 7 altoparlanti multidirezionati solista e orchestra	strutture sonore mobili, che esplorano 'condizioni di confine' (stati speciali in cui il sistema inizia a vibrare ma non è ancora stabile)	ibridi	sintesi modale	Modalys; impl. Stroppa, Laurenz
2017	SINA FALLAHZADEH	<i>Ziggurat</i>	fixed media			sintesi modale	Modalys
2017	MAURO LANZA	<i>Discorso di Gagarin attorno alla Terra</i>	per due pianoforti	materiale armonico derivante dall'analisi di spettri di placche quadrate		sintesi modale	Modalys

2017	GIORGIO SANCRISTOFORO	<i>Milanese Nwas</i>	fixed media	strutture astratte	astratto	FEM e sintesi modale	Tri-Axis Modeling Synthesis (TAMS) di Giorgio Sancristoforo
2017- 2019	HANS-PETER STUBBE TEGLBI/ÆRG	<i>Spherical Cities</i>	suoni di sintesi	strutture astratte	astratto	interazione di massa	Genesis
2018	NIOLETTA ANDREUCCETTI	<i>Resounding Resonances</i>	flauto, clarinetto, pianoforte e live electronics	strutture astratte disegnate con CAD 3D	astratto	sintesi modale	Tri-Axis Modeling Synthesis (TAMS) di Giorgio Sancristoforo
2018	CLAUDE CADOZ	<i>Quetzalcoatl</i>	installazione multisensoriale e interattiva	strutture astratte: <i>gongs-frères, big- bang lunaire, cosmic-snakes,</i> etc.	astratto	interazione di massa	Genesis – TGR – Hélicanthe: Cadoz
2019	GIUSEPPE GAVAZZA	<i>La foresta delle voci timide</i>	orchestra di altoparlanti	strutture astratte	astratto	interazione di massa	Genesis
2019	MAURO LANZA	<i>Experiments in the revival of organisms</i>	orchestra	materiale armonico derivante dall'analisi modale di <i>nastri di Möbius</i>		sintesi modale	Modalys; Lanza
2019- 2020	HANS-PETER STUBBE TEGLBI/ÆRG	<i>Anamorphic Circle</i>	suoni di sintesi in tempo reale con diffusione 3D su cupola di altoparlanti	struttura astratta: anello anamorfico	astratto	interazione di massa	Genesis e stazione aptica in tempo reale TELLURIS
2022	HANS-PETER STUBBE TEGLBI/ÆRG	<i>A Coronian Ring</i>	suoni di sintesi in tempo reale con diffusione 3D a 48 canali	struttura astratta	astratto	interazione di massa	Genesis

Bibliografia

- ACCORNERO, GIULIA, *Un'organologia critica per una nuova liuteria*, in *Fare strumento. Composizione, invenzione del suono e nuova liuteria*, a cura di Gabriele Manca e Luigi Manfrin, «Quaderni del Conservatorio Giuseppe Verdi di Milano», n.s. I (2017), pp. 13-23.
- ADAMS, JACK A., *A Closed-loop Theory of Motor Learning*, «Journal of Motor Behavior», III (1971), pp. 111-149.
- ADRIEN, JEAN-MARIE, *Simulation numérique de systèmes vibrants complexes : application à la synthèse sonore par modélisation physique*, Ph. D. thesis, Université de Paris VI, PARIS 1989.
- ADRIEN, JEAN-MARIE, *The Missing Link: Modal Synthesis*, in *Representations of Musical Signals*, Giovanni De Poli, Aldo Picalli, e Curtis Roads, MIT Press, Cambridge, MA 1991.
- AGAMBEN, GIORGIO, *Iustitium. Stato di eccezione*, in *Homo sacer*, Quodlibet, Macerata 2018, pp. 169-250.
- APPLETON, JON, *Things She Carried* (review), «Computer Music Journal», XXV (2001), pp. 85-86.
- BELSCHNER, TORSTEN, *Nota su SonoMorphis*, in <<https://www.bernd-lintermann.de/SonoMorphis/>> (accesso 21-12-2021).
- BERDAHL, EDGAR — SMITH III, JULIUS O., *An Introduction to the Synth-A-Modeler Compiler: Modular and Open-Source Sound Synthesis Using Physical Models*, in *Proceedings of the Linux Audio Conference*, Stanford, USA, 2012, pp. 93-99.
- BILBAO, STEFAN, *Parameterized Families of Finite Difference Schemes for the Wave Equation*, «Numerical Methods Partial Differential Equations» XX (2004), pp. 463-480.
- BILBAO, STEFAN, *Numerical Sound Synthesis: Finite Difference Schemes and Simulation in Musical Acoustics*, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ 2009.
- BISNOVATYI, ILIA, *Flexible Software Framework for Modal Synthesis*, in *Proceedings of the Digital Audio Effects Conference*, Verona 2000, pp. 109-14.
- BORK, INGOLF, *Modal Analysis of Sound Fields of Musical Instruments*, Preprint 3243, presented at the 92nd Convention Audio Engineering Society, New York 1992.
- BORIN, GIANPAOLO — DE POLI, GIOVANNI — SARTI, AUGUSTO, *Algorithms and Structures for Synthesis Using Physical Models*, «Computer Music Journal» XVI (1992), pp. 30-42.
- BORIO, GIANMARIO, *L'esperienza estetica sotto l'egida della tecnologia*, in *La musica fra testo, performance e media. Forme e concetti dell'esperienza musicale*, a cura di Alessandro Cecchi, Neoclassica, Latina 2019, pp. 31-54.
- BORNHOEFT, ACHIM, *Virtual String Program Note*, in <<http://www.sumtone.com/prog-note.php?workid=128>> (accesso 13-01-2021).

—BREGMAN, ALBERT S., *Auditory Scene Analysis. The Perceptual Organization of Sound*, MIT Press, Cambridge 1990.

—BRESSON, JEAN, *La synthèse sonore en composition musicale assistée par ordinateur : modélisation et écriture du son. Modélisation et simulation*, PhD. thesis, Université Pierre et Marie Curie – Paris VI, 2007.

—BRÜMMER, LUDGER, *Nota dell'autore*, in https://electrocd.com/en/oeuvre/20331/Ludger_Brümmer/-_Thrill (accesso 20-11-2021).

—BURNS, CHRIS – SERAFIN, STEFANIA – BURTNER, MATTHEW, *Musical Applications of Generalised Multichannel Digital Waveguides*, in *Proceedings of the Stockholm Music Acoustics Conference (SMAC 03)*, Stockholm 2003, pp. 1-4.

—BURTNER, MATTHEW – SERAFIN, STEFANIA, *Real Time Extended Physical Models for the Performer and Composer*, in *Proceedings of the International Computer Music Conference (ICMC)*, Havana 2001, pp. 251-254.

—BURTNER, MATTHEW – SERAFIN, STEFANIA, *Extended Techniques for Physical Models Using Instrumental Controller Substitution*, in *Proceedings of ISMA*, Perugia, 2001 [4 pp.]

—BURTNER, MATTHEW, *The Metasaxophone: Concept, Implementation, and Mapping Strategies for a New Computer Music Instrument*, «Organised Sound», VII (2002), pp. 201-213.

—BURTNER, MATTHEW – SERAFIN, STEFANIA, *Strictly Bowlroom: The Physically Modeled Singing Bowl in a Transformative Immersive Environment*, in *Proceedings of ISMA*, Mexico-City 2002 [5 pp.].

—BURTNER, MATTHEW – TOPPER, DAVID, *Recombinant Spatialization for Ecoacoustic Immersive Environments*, in *Proceedings Linux Audio Developers Conference (LAD 2)*, Karlsruhe 2004, pp. 19-25.

—BURTNER, MATTHEW, *Nota di sala su That Which is Bodiless is Reflected in Bodies* (2004), in <http://matthewburtner.com/thatwhichisbodiless-album/> (accesso 05/01/2021).

—BURTNER, MATTHEW, *Nota sul Metasaxophone*, in <https://ccrma.stanford.edu/~mburtner/metasax.html> (accesso 04-01-2021).

—CADOZ, CLAUDE, *Synthèse sonore par simulation de mécanismes vibratoires, application aux sons musicaux*, Ph. D. thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble, Grenoble 1979.

—CADOZ, CLAUDE, Cfr. CADOZ, *Nota dell'autore su Gaea*, in https://zkm.de/media/file/en/programm_ambient_digital_creativity.pdf (accesso 06-01-2021).

—CADOZ, CLAUDE – LUCIANI, ANNIE, *Responsive Input Devices and Sound Synthesis by Simulation of Instrumental Mechanisms: The Cordis System*, «Computer Music Journal», VIII (1984), pp. 60-73.

—CADOZ, CLAUDE, *Instrumental Gestures and Musical Composition*, in *Proceedings of the 1988 International Computer Music Conference*, (ICMC 1988), Köln 1988, pp. 1-14.

—CADOZ, CLAUDE – LUCIANI, ANNIE – FLORENS, JEAN-LOUP, *CORDIS-ANIMA: A Modelling and Simulation System for Sound and Image Synthesis: The General Formalism*, «Computer Music Journal», XVII (1993), pp. 19-29.

—CADOZ, CLAUDE – LUCIANI, ANNIE, FLORENS, JEAN-LOUP, *Physical Models for Music and Animated Image: The use of Cordis-Anima in Esquisses a Music Film by ACROE*, in *International Computer Music Conference 1994*, Aarhus 1994. pp.11-18.

—CADOZ, CLAUDE, *The Physical Model as Metaphor for Musical Creation: "pico..TERA", a Piece Entirely Generated by Physical Model*, in *Proceedings of the International Computer Music Conference ICMC 2002*, MPublishing, Gothenburg 2002, pp. 305-312.

—CADOZ, CLAUDE – LUCIANI, ANNIE – FLORENS, JEAN- LOUP– CASTAGNÉ, NICOLAS, *Artistic Creation and Computer Interactive Multisensory Simulation Force Feedback Gesture Transducers*, in

Proceedings of the 2003 Conference on New Interfaces for Musical Expression (NIME-03), Montreal 2003.

—CADOZ, CLAUDE, *Supra-Instrumental Interactions and Gestures*, «Journal of New Music Research», XXXVIII (2009), pp. 215-230.

—CADOZ, CLAUDE, *Concepts and Technologies for Multisensory and Interactive Simulation of Physical Objects – Application to Helios, a musical and visual artwork for the Hélicanthe Platform of the ACROE*, in *Proceedings of the 15th Sound and Music Computing Conference*, Limassol, Cyprus 2018, pp. 18-41.

—CADOZ, CLAUDE, *Genesis 4th Generation / Nomadicity / Gesture Emulation. Real-time Cordis-anima Physical Modeling and High Performance Force-feedback Interaction within the Hélicanthe Workstation*, in *Proceedings of the 17th Sound and Music Computing Conference*, Turin 2020, pp. 308-315.

Hélicanthe CADOZ, CLAUDE, *La plateforme Hélicanthe: modélisation physique cordis-anima temps réel – Genesis – 4^E generation*, «Journées d’Informatique Musicale 2020 – Préactes», [15 pp.].

—CALVET, OLIVIER – LAURENS, RONAN - ADRIEN, JEAN-MARIE, *Modal Synthesis: Compilation of Mechanical Sub-Structures and Acoustical Sub-Systems*, in *Proceedings of the 1990 International Computer Music Conference*, San Francisco 1990 pp. 57-59.

—CASTAGNÉ, NICOLAS – CADOZ, CLAUDE, *Creating Music by Means of ‘Physical Thinking’: The Musician Oriented Genesis Environment*, in *Proceedings of the 5th International Conference on Digital Audio Effects (DAFX-02)*, Hamburg 2002, pp. 169-174.

—CASTAGNÉ, NICOLAS – CADOZ, CLAUDE, *10 Criteria for Evaluating Physical Modelling Schemes for Music Creation*, Digital Audio Effects Conference DAF-X, London 2003, [7 pp.].

—CASTAGNÉ, NICOLAS – CADOZ, CLAUDE – FLORENS, JEAN-LOUP, *Physically-based Modeling and Music vs. Physical Modeling and Acoustics*, in *International Congress on Acoustics 2004*, Kyoto 2004, pp. [1-5].

—CASTAGNÉ, NICOLAS – CADOZ, CLAUDE, *A Goals-Based Review of Physical Modelling*, in *Proceedings of the International Computer Music Association*, Barcelona 2005, pp. 343-346.

—CASTAGNÉ, NICOLAS – CADOZ, CLAUDE, *G3: Genesis Software Environment Update*, *Proceedings of the international Computer Music Conference (ICMC 2009)*, Montreal 2009, pp. 407-410.

—CRRMA Overview, Aprile 2000, Report n. STAN-M-106, pp. 1-66: 17-18, in
<<https://ccrma.stanford.edu/files/papers/stanm106.pdf>> (accesso 03-01-2021)

—CCRMA STANFORD WEBSITE, *nota su Straw-berri* (1997), in
<<https://ccrma.stanford.edu/~juanig/descrips/strawberri.html>> (accesso 10-01-2021).

—CCRMA STANFORD WEBSITE, *nota su Ping*,
in <<https://ccrma.stanford.edu/~cc/pub/txthtml/ping.html>>. (accesso 10-01-2021).

—CHAFE, CHRIS, *Simulating Performance on a Bowed Instrument*, in *Current Directions in Computer Music*,
edited by Max Mathews, MIT Press, Cambridge, MA 1989, pp. 185–198.

—CHAFE, CHRIS, *Tactile Audio Feedback*, in *Proceedings of International Computer Music Conference*, Aarhus 1993, pp. 76-79.

—CHAFE, CHRIS, *Adding Vortex Noise to Wind Instrument Physical Models*, in *Proceedings of the International. Computer Music Conference*, Banff 1995, pp. 57-60.

—CHAFE, CHRIS, *Celletto*, in *Stanford University News Service* del 15-1-1997, in
<<https://news.stanford.edu/pr/97/970115chafeprof.html>> (accesso 03-01-2021).

—CHAFE, CHRIS, *Nota dell'autore* <<https://chrischafe.net/portfolio/celletto-pieces/>> (accesso 03-01-2021).

—CHAFE, CHRIS, *Transect* (1999), in CRRMA Overview, Aprile 2000, Report n. STAN-M-106, p. 17.

—CHAFE, CHRIS, *Nota su Transect* (1999), in <<https://chrischafe.net/transect/>> (accesso

03/01/2021)>.

—CHAFE, CHRIS, *Case Studies of Physical Models in Music Composition*, in *Proceedings of 18 The International Congress on Acoustics*, Kyoto 2004, [5 pp.].

—CHAFE, CHRIS, *Oxygen Flute: A Computer Music Instrument that Grows*, «Journal of New Music Research», XXXIV (2005), pp. 219–226.

—CHAIGNE, ANTOINE — ASKENFELT, ANDERS, — ERIC V. JANSSON, *Temporal Synthesis of String Instrument Tones*, in «Quarterly Progress and Status Report», IV (1990), pp. 81-100.

—CHAIGNE, ANTOINE, *On the Use of Finite Differences for Musical Synthesis. Application to Plucked Stringed Instruments*, «Journal d'Acoustique», V (1992), pp. 181-211.

—CHAIKEN, ALISON — ANN ARBOR, *Intervista a John Chowning*, 2006, Internet Audio Resource, <http://en.wikipedia.org/wiki/File:JohnChowning041306_part1.ogg>.

—CHOMSKY, NOAM, *La grammatica trasformativa. Scritti espositivi*, Bollati-Boringhieri, Torino 1975.

—CHOWNING, JOHN M., *Arte e scienza: Un'esperienza personale*, in *Arte e scienza del suono*, a cura di Cesare Beltrami, Franco Angeli, Milano 2003.

—CHOWNING, JOHN M., *Perceptual Fusion and Auditory Perspective*, in *Music, Cognition, and Computerized Sound*, The MIT Press, Cambridge 1991, pp. 261-275.

—CHOWNING, JOHN M., *The Synthesis of Complex Audio Spectra by Means of Frequency Modulation*, «Computer Music Journal», I (1977), pp. 46-54.

—CIANCIUSI, WALTER, *Michelangelo Lupone: "Corda di metallo" (1997)*, in *International Computer Music Conference Proceedings*, Barcelona 2005, [4 pp.].

—COGAN ROBERT, *New Images of Musical Sound*, Harvard University Press, Cambridge 1984, pp. 108-112.

—COOK PERRY, *Identification of Control Parameters in an Articulatory Vocal Tract Model, with Applications to the Synthesis of Singing*, PhD. thesis Stanford University (CCRMA), 1990.

—COOK PERRY, *A Meta-Wind-Instrument Physical Model, and a Meta-Controller for Real-Time Performance Control*, in *Proceedings of the International Computer Music Association*, 1992, pp. 273-276.

—COOK PERRY, *SPASM: A Real-Time Vocal Tract Physical Model Editor/Controller and Singer: The Companion Software Synthesis System*, «Computer Music Journal», XVII (1992), pp. 30-44.

—COOK PERRY, *Nota su El Zorro II (1992)*, in *Stanford University News Service* del 15-1-1997, in <<https://news.stanford.edu/pr/97/970115chafeprof.html>> (accesso 03-01-2021).

—COOK PERRY, *Recently Completed Work (1995)*, in <<https://www.cs.princeton.edu/~prc/RecentWork.html>> (accesso 05-01-2021).

—COOK PERRY, *Physically Informed Sonic Modeling (PhISM): Percussive Synthesis*, in *Proceedings of the International Computer Music Conference (ICMC 1996)*, Hong Kong 1996, pp. 228-231.

—COOK, PERRY R., *Physically Informed Sonic Modeling (PhISM): Synthesis of Percussive Sounds*, «Computer Music Journal», XXI (1997), pp. 38-49.

—COOK, PERRY R. — SCAVONE, GARY, *The Synthesis ToolKit (STK)*, in *Proceedings of the International Computer Conference*, Beijing 1999, pp. 1-4.

—COOK, PERRY R. — SCAVONE, GARY, *The Synthesis ToolKit in C++ (STK)*, in <<https://ccrma.stanford.edu/software/stk/information.html>> (accesso 26-12-2020).

—COOK PERRY, *Principles for Designing Computer Music controllers*, in *Proceedings of the CHI'01 Workshop on New Interfaces for Musical Expression (NIME-01)*, Seattle 2001, [4 pp.].

- COOK, PERRY R.— LAKATOS, STEPHEN, *Using Dsp-Based Parametric Physical Synthesis Models to Study Human Sound Perception*, in *Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics*, IEEE, New Paltz, NY 2003, s.n.p [4 pp.].
- COOK, PERRY R., *Remutualizing the Musical Instrument: Co-Design of Synthesis Algorithms and Controllers*, «Journal of New Music Research», XXXIII (2004) pp. 1-4.
- COOK, PERRY R., *Perry's Notes from the Original Distribution of STK*, in <<https://ccrma.stanford.edu/software/stk/information.html>> (accesso 26-12-2020).
- COX, ARNIE, *Music and Embodied Cognition: Listening, Moving, Feeling, and Thinking (Musical Meaning and Interpretation)*, Indiana University Press, Bloomington 2016.
- CRAWFORD, FRANCK S., *Waves*, MCGRAW-HILL, NEW YORK 1968.
- Current Directions in Computer Music Research*, edited by Max Mathews e John R. Pierce, MIT Press, Cambridge, MA 1991.
- DE DOMINICIS, IDA, *L'interiorizzazione della tecnica. Dal protesico all'estetico*, in *Limiti e confine del post-umano*, a cura di Giovanni Leghissa, Carlo Molinari Min, Carlo Salzani, «Lo Sguardo», XXIV (2017), pp. 127-141.
- DELALANDE, FRANÇOIS, *Le condotte musicali, Comportamenti e motivazioni del fare e ascoltare musica*, a cura di Giovanna Guardabasso e Luca Marconi, CLUEB, Bologna 1993.
- DELEUZE, GILLES, *Différence et répétition*, PUF, Paris 1968.
- DELEUZE, GILLES — GUATTARI, FÉLIX, *Millepiani. Capitalismo e schizofrenia*, Castelveccchi, Roma 2003.
- DE POLI, GIOVANNI — DRIOLI, CARLO — AVANZINI, FEDERICO, *Sintesi dei segnali audio, Dispense dell'Università di Padova*, in <<https://www.dei.unipd.it/~musica/IM/cap5.pdf>> (accesso 21/02/2022), cap. 5, pp. 5.1-5.53.
- DI SCIPIO, AGOSTINO, *Tecnologia dell'esperienza musicale nel Novecento*, «Rivista Italiana di Musicologia», XXXV (2000), pp. 211-245.
- DUDAS, RICHARD — PIECHAUD, ROBERT, *Modalys Documentation v. 3.5.0*, in <<https://support.ircam.fr/docs/Modalys/current/co/Introduction.html>> (accesso 10/08/2021).
- DUFOURT, HUGHUES, *L'artifice d'écriture dans la musique occidentale*, «Critique » CCCCXVIII (1981), p. 465-77.
- DUFOURT, HUGHUES, *Difficoltà di una presa di coscienza teorica*, in *Teoria e prassi della musica nell'era dell'informatica*, scritti raccolti e tradotti da Agostino Di Scipio, Giuseppe Laterza editore, Bari 1995.
- DZIAPARIDZE, MICHAËL, *Exploring the Creative Potential of Physically Inspired Sound Synthesis*, Ph.D. thesis, Queen's University of Belfast, 2015.
- Elektroakustische Musik vom ZKM (Zentrum für Kunst und Medientechnologie Karlsruhe)* in <http://www.neue-musik-lueneburg.de/events_studienwoche_zkm_nacht.php> (accesso 06/01/2021).

- EMMERSON, SIMON, *Music Imagination Technology, Keynote Address*, in *Proceedings of the 2011 International Computer Music Conference*, Huddersfield 2011, pp. 7-24.
- ESSL, GEORG, *Physical Wave Propagation Modeling for Real-Time Synthesis of Natural Sound*, Ph.D. thesis, Princeton University, 2002 pp. 94-97.
- ESSL, GEORG— SERAFIN, STEFANIA— COOK — SMITH III, JULIUS O., *Musical Applications of Banded Waveguides*, «Computer Music Journal», XXVIII (2004), pp. pp. 51-63.
- ESSL, GEORG— SERAFIN, STEFANIA— COOK — SMITH III, JULIUS O., *Theory of Banded Waveguides*, «Computer Music Journal», XXVIII (2004), pp. 37-50.
- FLORENS, JEAN-LOUP — CADOZ, CLAUDE, *The Physical Model: Modeling and Simulating the Instrumental Universe*, in *Representations of Musical Signals*, edited by Giovanni De Poli, Aldo Piccialli, and Curtis Roads, The MIT Press, Cambridge, MA 1991, pp. 227-268.
- FLORENS, JEAN-LOUP, *Real time Bowed String Synthesis with Force Feedback Gesture*, «Acta Acustica», LXXXVIII (2002), s.n.p.
- FLORENS, JEAN-LOUP — CADOZ, CLAUDE — CASTAGNÉ, NICOLAS, *ERGOS: Multi-degrees of Freedom and Versatile Force-Feedback Panoply*, *EuroHaptics 2004*, Munich 2004, pp. 356-360.
- FLORENS, JEAN-LOUP, *Coupleur gestuel interactif pour la commande et le contrôle de sons synthétisés en temps réel*, *Interface homme-machine* [cs.HC], Ph. D. thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 1978.
- FONTANA, FEDERICO — AVANZINI, FEDERICO — PAPETTI, STEFANO — JÄRVELAINEN, HANNA — KLAUER, GIORGIO — MALAVOLTA, LORENZO, *Un prototipo di pianoforte digitale con feedback vibrotattile*, in *Proceedings of Colloquium on Musical Informatics (XXI CIM)*, Cagliari 2016, pp. 151-157.
- Foundations of Computer Music*, edited by Curtis Roads e John Strawn, MIT Press, Cambridge, MA 1987.
- FOUCAULT, MICHEL, *Tecnologie del sé. Un seminario con Michel Foucault*, Bollati-Boringhieri, Torino 1992.
- FOURCADE, PATRICK, *Étude et simulation des phénomènes percussifs dans les instruments de musique. Modélisation et simulation*, Ph.D. thesis, Université de la Méditerranée, Grenoble 2001;
- FOURCADE PATRICK — Cadoz, CLAUDE, *Physical Modeling for Sound Synthesis with Particle – Interaction Networks: Study of the Percussion Phenomena and Design of generic rules for Percussions*, in *Proceedings of the International Computer Music Conference (ICMC 2001)*, Havana 2001, [4 pp.].
- FREGNAN, ANDREA, *Controllo gestuale di modelli fisici per la sintesi sonora di membrane percosse*, tesi di laurea in ingegneria informatica, Università di Padova, a. a. 2011-12.
- ECKEL, GERHARD — IOVINO FRANCISCO — CAUSSÉ, RENÉ. *Sound Synthesis by Physical Modelling with Modalys*, in *Proceedings of the International Symposium on Musical Acoustics*, Dourdan 1995, pp. 479-482.
- GALANTE, FRANCESCO — SANI, NICOLA, *Musica espansa. Percorsi elettroacustici di fine millennio*, Ricordi-LIM, Milano-Lucca 2000 (*Le Sfere*).
- GARTON, BRAD, *Virtual Performance Modeling*, in *Proceedings of the 1992 International Computer Music Conference*, (ICMC 1992), San Jose 1992, pp. 219-222.

- GAVAZZA, GIUSEPPE, *De Rerum Natura: Physical Modelling as a Tool for Musical Composition*, Ph. D. thesis, ICA-ACROE, Institut Polytechnique de Grenoble, Grenoble 2017.
- GAVER, WILLIAM, *How Do We Hear in the World?: Explorations in Ecological Acoustics*, «Ecological Psychology», V (1993), pp. 285-313.
- GIBSON, JAMES J., *The Ecological Approach to Visual Perception*, Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, NJ 1986
- GORELLI, TOMMASO, *Intervista a Mauro Lanza e Andrea Valle per la prima italiana di Regnum* (06-07-2015), in <<https://www.thenewnoise.it/i-regnum-di-andrea-valle-e-mauro-lanza/>> (accesso 7-11-2021).
- GRAU, OLIVER, *Immersion and Interaction. From Circular Frescoes to Interactive Image Spaces*, in <http://www.medienkunstnetz.de/themes/overview_of_media_art/immersion/>, p. 28 (accesso 21-12-2021).
- GRAZIANI, MAURO, *Tecniche di sintesi*, in <http://www.maurograziani.org/text_pages/tecniche_sintesi/intro/MG_Sintesi2.html>.
- GRISEY, GERARD, *Tempus ex machina*, in *Écrits*, éditions MF, Paris 2008.
- GROISON DAVID, *Intervista a Mauro Lanza* (01-01-2001), <<https://www.01net.com/actualites/jai-compose-une-piece-pour-une-centaine-dinstruments-virtuels-137424.html>> (accesso 7-11-2021).
- GUIDARINI LUCA, *Tra nubi, selve, giardini e tassonomie: nuova liuteria elettromeccanica ed elettroacustica nelle pratiche musicali di Mauro Lanza, Andrea Valle e Simone Pappalardo*, «Musica/Tecnologia», XV (2021), pp. 31-80.
- HAYES, LAUREN, *Performing Articulation and Expression Through a Haptic Interface*, in *Proceedings of the International Computer Music Conference (ICMC)*, Lubiana 2012, pp. 400-403.
- HELIE, THOMAS, *Modélisation physique d'instruments de musique en systèmes dynamiques et inversion*, Ph. D. thesis, Université de Paris XI, 2002.
- HELMHOLTZ, HERMANN VON, *Die Lehre von der Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik*, Druck und Verlag von Friedrich Vieweg und Sohn, Braunschweig 1875.
- HELMHOLTZ, HERMANN VON, *On the Sensations of Tone as a Physiological Basis for the Theory of Music*, New York, Dover 1954 (1^a ed. 1875).
- HEIDEGGER, MARTIN, *La questione della tecnica* (1953), in ID., *Saggi e discorsi*, a cura di Gianni Vattimo, Mursia, Milano 1976, pp. 5-27.
- HELIE, THOMAS, *Modélisation physique d'instruments de musique en systèmes dynamiques et inversion*, Ph. D. thesis, Université de Paris XI, Paris 2002.
- HERNANDEZ SANCHEZ, JUAN CAMILO, *The Genesis of Mauro Lanza's Aschenblume and the Role of Computer Aided Composition Software in the Formalisation of Musical Process*, a cura di Carlos Agon, Gérard Assayag, Jean Bresson, THE OM COMPOSER'S BOOK 1, Ircam, Centre Pompidou, Paris 2006, pp. 65-84.

- HERVÉ, JEAN-LUC, *Dans le vertige de la durée* (*Vortex Temporum de Gérard Grisey*), L'Harmattan, Paris 2001.
- HILLER, LEJAREN – RUIZ, PIERRE, *Synthesizing Musical Sounds by Solving the Wave Equation for Vibrating Objects*, «Journal of the Audio Engineering Society» XIX (1971), pp. 463-470 e 542-551.
- HOLMES, THOM, *Electronic and Experimental Music*, Routledge, London, 2016.
- HUFSCMITT, ALINE, *La Synthèse Par Modeles Physiques*, Ph. D. thesis, Université de Paris Sorbonne (Paris IV), 2000.
- HUTCHINS, BERNARD A., *Special Issue D: A Review of Fourier Methods in Signal Processing and Musical Engineering*, «Electronotes», XV (1984), pp. 155-160.
- IMBAULT, CHARLOTTE, *Intervista a Mauro Lanza* (16-10-2009), in <<https://www.lintermede.com/portrait-mauro-lanza.php>> (accesso 7-11-2021).
- IOVINO, FRANCISCO – DUDAS, RICHARD – CAUSSÉ, RENÉ – MISDARIIS, NICOLAS – POLFREMAN RICHARD, *Modalys: a Synthesizer for the Composer-Luthier-Performer*, in *Proceedings of the International Computer Music Conference (ICMC)*, Ann Arbor, Michigan, 1998, pp. 1-35.
- IPPOLITI EMILIANO, *Modelli d'inferenza plausibile*, Ph. D. thesis, Università La Sapienza di Roma, a.a. 2004-05.
- IVERSON, JENNIFER, *Electronic Inspirations: Technologies of the Cold War Musical Avant-Garde*, Oxford University Press, New York, 2019.
- JAFÉ, DAVID A., *Nota su Silicon Valley Breakdown* (1982), in <<https://www.davidajaffe.com/music/silicon-valley-breakdown>> (accesso 04-01-2021).
- JAFÉ, DAVID A. – SMITH III, JULIUS O. *Extensions of the Karplus-Strong Plucked String Algorithm*, «Computer Music Journal», VII (1983), pp. 56-69.
- JAFÉ, DAVID A., *Film del 1984 di George Olczak*, in cui Jaffe discute la realizzazione di *Silicon Valley Breakdown*, in <<https://www.davidajaffe.com/music/silicon-valley-breakdown>> (accesso 04/01/2021)
- JAFÉ, DAVID A. – BOYNTON, LEE, *An Overview of the Sound and Music Kits for the NeXT Computer*, «Computer Music Journal», XIII (1989), pp. 48-55.
- JAFÉ, DAVID A., Conferenza dal titolo *The Making of Silicon Valley Breakdown*, presentata all'Università di Victoria, in Canada, il 6 Novembre, 2013, nel contesto dell'Orion Visitor Residency 2013 in <<https://www.davidajaffe.com/music/silicon-valley-breakdown>> (accesso 04/01/2021)
- JAFÉ, DAVID A., *Intervista del 17-01-2017*, in <<https://musicguy247.typepad.com/my-blog/2017/01/david-a-jaffe-interview-electronic-music-composer-pioneer-software-developer-next-computers-silicon-valley-breakdown-1.html>> (accesso 04/01/2021).
- KARPLUS, KEVIN – STRONG, ALEX, *Digital Synthesis of Plucked String and Drum Timbres*, «Computer Music Journal», VII (1983), pp. 43-55.
- KEEFE, DOUGLAS H., *Physical Modeling of Wind Instruments* «Computer Music Journal», XVI (1992), pp. 57-73.

—KELLY, JOHN L. — LOCHBAUM, CAROL C., *Speech Synthesis*, in *Proceedings of the 4th International Congress on Acoustics*, Copenhagen 1962, Paper G42, pp. 1-4, ristampato in *Speech Synthesis*, edited by James L. Flanagan and Lawrence R. Rabiner, Dowden, Hutchinson and Ross, Stroudsburg 1973, pp. 127-130.

—KELLY, JOHN L. — LOCHBAUM, CAROL C., *Speech Synthesis*, in *Proceedings of the Stockholm Speech Communication Seminar*, Stockholm 1962, Paper F7.

—KOENIG, GOTTFRIED-MICHAEL, *Studium im studio*, «Musique en Jeu», VIII (1972), *Musiques Électro-Acoustique*, pp. 11-18.

—KOJS, JURAJ, *Concealed* (2006), partitura, in <http://kojs.net/Action_Music/Kojs-Concealed.pdf> (accesso 15-12-2021).

—KOJS, JURAJ — SERAFIN, STEFANIA — CHAFE, CHRIS, *Cyberinstruments via Physical Modeling Synthesis: Compositional Applications*, «Leonardo Music Journal», XVII (2007), pp. 61-66.

—KOJS, JURAJ — SERAFIN, STEFANIA, *Digitally Augmented Everyday Objects in Music Composition*, in *Proceedings SMC'07, 4th Sound and Music Computing Conference*, Lefkada 2007, pp. 338-344.

—KOJS, JURAJ — SERAFIN, STEFANIA, *Stirring, Shaking, and Mixing: Musicalizing Everyday Actions*, in *Proceedings of the International Computer Music Conference*, Copenhagen 2007, pp. 37-40.

—KOJS, JURAJ — SERAFIN, STEFANIA, *Augmenting Sonic Reality. Cyberinstruments Designed with Digital Waveguides*, «Digital Creativity», XIX (2008), pp. 77-90.

—KOJS, JURAJ, *Cyberactions and Cyberinstruments via Physical Modeling Synthesis: Extending Musical Realities*, Ph. D Thesis, University of Virginia 2008.

—KOJS, JURAJ, *The Language of Action and Cyberaction-based Music: Theory and Practice*, «Journal of New Music Research», XXXVIII (2009), pp. 285-294.

—KOJS, JURAJ, *Notating Action-Based Music*, «Leonardo Music Journal», XXI (2011), pp. 65-72.

—KOJS, JURAJ, *Virtual Reality and Sonic Cyberspaces: Augmentation, Hybridisation and Abstraction*, «International Journal of Arts and Technology», VI (2013), pp. 167-180.

—KONTOTHEORGAKOPOULOS, ALEXANDROS — CADOZ, CLAUDE, *Cordis-Anima Physical Modeling and Simulation System Analysis*, *Proceedings of the 4th Sound and Music Computing Conference*, Lefkada 2007, pp. 275-282.

—LAKATOS, STEPHEN — COOK, PERRY R. — SCAVONE, GARY, *Selective Attention to the Parameters of a Physically Informed Sonic Model*, «Journal of the Acoustical Society of America», CVII (2000), *Acoustic Research Letter Online* 2000, pp. 31-36.

—LAKOFF GEORGE — JOHNSON MARK, *Philosophy in the Flesh: The Embodied Mind and Its Challenge to Western Thought*, Basic Books, New York 1999.

—LANSKY, PAUL, *Intervista del gennaio 1997*, in <<http://www.electronicmusic.com/features/interview/paullansky.html>> (accesso 04-01-2021).

—LANSKY, PAUL, *Music box* (2006), producer Robert J. Starobin, Bridge 9210.

—LANSKY, PAUL, *Reflections on Spent Time. Keynote Address*, in *International Computer Music Conference*, Montreal 2009, pp. 1-13.

—LANZA, MAURO, *Programma di sala*, in <https://medias.ircam.fr/media/old_archives/programnote/LO38017-01-wm.pdf> (accesso 7-11-2021).

—LANZA, MAURO, *Programma di sala* (13-06-2002), in <<http://vortice.provincia.venezia.it/Virtuosi%20Virtuali.htm>> (accesso 8-11-2021).

—LANZA MAURO, *Programma di sala* (08-03-2005), in <<http://smcq.qc.ca/smcq/en/oeuvre/21532/Aschenblume>> (accesso 8-11-2021).

- LANZA, MAURO, *Programma di sala* (28-05-2007), in <<https://brahms.ircam.fr/works/work/18977/>> (accesso 9-11-2021).
- LANZA, MAURO, *Programma di sala* (14-03-2008), in <<https://brahms.ircam.fr/works/work/32254/>> (accesso 9-11-2021).
- LANZA, MAURO, *Programma di sala* (17-06-2012), in <<https://brahms.ircam.fr/works/work/41092/#program>> (accesso 9-11-2021).
- LANZA, MAURO, *Programma di sala* (21-03-2019), in <<https://www.ricordi.com/it-IT/News/2019/03/Lanza-in-Cologne.aspx>> (accesso 9-11-2021).
- LANZA, MAURO, *I funerali dell'anarchico Passannante*, Milano, Ricordi, 2006.
- LANZA, MAURO, *Petit inventaire d'objets quotidiens*, comunicazione dell'autore.
- LANZA, MAURO, *Entretien #16* (luglio 2018), in <<http://musiquealgorithmique.fr/entretien-16-mauro-landa/>> (accesso 7-11-2021).
- LATERZA, MARILENA, *Intervista a Mauro Lanza* (10-03-2012), in <<https://marilenalaterza.wordpress.com/2012/03/10/mauro-landa-intervista/>> (accesso 8-11-2021).
- LAURSON, MIKAEL, *PWConstraints*, IRCAM Documentation, in <<https://support.ircam.fr/docs/om-libraries/old/PW-Constraints.pdf>> (accesso 20-02-2022).
- LEONARD, JAMES, CADOZ, CLAUDE, CASTAGNÉ, NICOLAS AND LUCIANI, ANNIE, *A Virtual Reality Platform for Musical Creation in Proceedings of the 10th International Symposium on Computer Music Multidisciplinary Research*, Marseille 2013, pp. 267-282.
- LEONARD, JAMES — CASTAGNÉ, NICOLAS — CADOZ, CLAUDE — LUCIANI, ANNIE, *The MSCI Platform: A Framework for the Design and Simulation of Multisensory Virtual Musical Instruments, in Musical Haptics*, Berlin, Springer, 2018, pp. 151-169.
- LEONARD, JAMES— VILLENEUVE, JÉRÔME— KOTOGEOGAKOPOULOS, ALEXANDROS, *Multisensory Instrumental Dynamics as an Emergent Paradigm for Digital Musical Creation*, «Journal on Multimodal User Interfaces», XIV (2020), pp. 235-253.
- LEONARDO DA VINCI, *Descrizione del diluvio* (Codice Windsor, fol. 12665r), in *Scritti letterari*, a cura di Augusto Marinoni, Rizzoli, BUR, Milano 1952.
- LEMAN, MARC, *Embodied Music Cognition and Mediation Technology*, The MIT Press, Cambridge, MA 2008.
- LEMAN, MARC, — PIETR-JAN MAES, *Music Perception and Embodied Music Cognition*, in *The Routledge Handbook of Embodied Cognition*, London, Routledge, 2014, pp. 81-88.
- LÉVY, FABIEN, *Complexité grammatologique et complexité apercptive en musique*, Ph.D. thesis, École des Hautes Études En Sciences Sociales, Paris 2004.
- LÉVY, FABIEN, *Mutations (1969) de Jean-Claude Risset: une écriture déjouée par des paradoxes*, in *Portrait Polychrome, n°2, Jean-Claude Risset*, INA/GRM éd., 2ème edition, Paris 2008, pp. 63-82.
- LOMBARDO, VINCENZO — VALLE, ANDREA, *Audio e multimedia*, Apogeo, Milano 2008.
- LONCHAMPT, JACQUES, *Jouer de l'ordinateur à la Biennale de Venise*, *Le Monde* del 05-10-1982.
- LUPONE, MICHELANGELO, Copia della Partitura manoscritta non pubblicata di *Corda di metallo*, in Biblioteca della Scuola di Musica di Fiesole (collocazione: F.NOVECENTO.LUPONE.01).
- LUPONE, MICHELANGELO, *Spazio, arco e metallo*, in *Musica tecnologia interazioni*, «Quaderni della Civica Scuola di Musica», XIV (1999), pp. 80-89.

- [LUPONE, MICHELANGELO], *Scheda relativa all'opera* Canto di madre, in <<http://www.federazioneceemat.it/index.php?id=5.4&lg=it&pag=opera&wh=142>> (accesso 20-12-2020)
- MANNING, PETER, *Electronic and Computer Music*, Oxford University Press, New York 2013.
- MANOVICH, LEV, *Information as an Aesthetic Event*, Lecture at the Tate Modern, London 8 settembre 2007, in <<http://manovich.net/index.php/projects/information-as-an-aesthetic-event>> (accesso 12-12-2021).
- MAYER, ALFRED M., *Sound: A Series of Simple, Entertaining, and Inexpensive Experiments in the Phenomena of Sound*, Appleton, New York 1878.
- MCINTYRE, MICHAEL E. — SCHUMACHER, ROBERT T. — WOODHOUSE, JAMES, *On the Oscillation of the Musical Instruments*, «Journal of the Acoustic Society of America», LXXIV (1983), pp. 1325-1345.
- MEDIA ART NET, *Descrizione di SonoMorphis*, in <<http://www.medienkunstnetz.de/works/sonomorphis/>> (accesso 21-11-2020).
- MEUCCI, RENATO, *Organologia: definizione e contenuti di una recente ricerca*, in *Il museo degli strumenti Musicali del Conservatorio Luigi Cherubini*, a cura di Mirella Branca, Sillabe, Livorno 1999, pp. 108-119.
- MICHAILIDIS TYCHONAS — HOCKMAN, JASON, *Affordances of Vibrational Excitation for Music Composition and Performance*, in *Proceedings of the 15th Sound and Music Computing Conference (SMC2018) – Sonic Crossings*, Limassol 2018, pp. 382–387.
- MICHON, ROMAIN — SMITH III, JULIUS O., *Faust-STK: a Set of Linear and Nonlinear Physical Models for the Faust Programming Language*, in *Proceedings of the 14th International Conference on Digital Audio Effects (DAFx-11)*, Paris 2011, pp. 199-204.
- MICHON, ROMAIN, *Modélisation physique d'instruments de musique par guides d'ondes numériques – enjeux, environnements existants, implémentation, perfectionnements et utilisation*, Master thesis, Université Jean Monnet, Saint-Etienne 2012.
- MICHON, ROMAIN — SMITH III, JULIUS O., *A Hybrid Guitar Physical Model Controller: The BladeAxe*, in *Proceedings ICMC/SMC/2014*, Athens 2014, pp. 573-579.
- MICHON, ROMAIN — SARA MARTIN, SMITH III, JULIUS O., *Mesh2Faust: a Modal Physical Model Generator for the Faust Programming Language - Application to Bell Modeling*, in *Proceedings of the 2017 International Computer Music Conference, ICMC*, Shanghai 2017.
- MICHON, ROMAIN — SMITH III, JULIUS O. — WRIGHT, MATTHEW — CHAFE, CHRIS — GRANZOW, JOHN — WANG, GE, *Mobile Music, Sensors, Physical Modeling, and Digital Fabrication: Articulating the Augmented Mobile Instrument*, «Applied Sciences», VII (2017), pp. 1311-1320.
- MICHON, ROMAIN — SMITH III, JULIUS O. — ORLAREY, YANN, *New Signal Processing Libraries for Faust*, in *Proceedings of the Linux Audio Conference*, Saint-Etienne 2017, pp. 83-87.
- MICHON, ROMAIN — SMITH III, JULIUS O. — CHAFE, CHRIS — WANG, GE — MATTEW WRIGHT, *The Faust Physical Modeling Library: A Modular Playground for the Digital Luthier*, in *Proceedings of the 1st International Faust Conference (IFC-18)*, Mainz 2018, pp. 1-6.
- MICHON, ROMAIN, SMITH III, JULIUS O. — WRIGHT, MATTEW — CHAFE, CHRIS — JOHN GRANZOW, WANG, GE, *Mobile Music, Sensors, Physical Modeling, and Digital Fabrication: Articulating the Augmented Mobile Instrument*, «Applied Sciences», VII (2019), pp. 1311-1320.
- MCINTYRE, MICHAEL E. — WOODHOUSE, JIM, *On the Fundamentals of Bowed String Dynamics*, «Acta Acustica united with Acustica», XXXXIII (1979), pp. 93-108.

- MILLER, DAYTON CLARENCE, *Anecdotal History of the Science of Sound to the Beginning of the 20th Century*, «Nature», CXXXVII (1936), pp. 1013-1014.
- MOLINO, JEAN, *Fait musical et sémiologie de la musique*, «Musique en jeu», XVII (1975), pp. 37-62.
- MORREALE, FABIO, *A Holistic Approach to the Design of Digital Musical Instruments*, in *Proceedings of the 22nd CIM*, Udine 2018, pp. 37-38.
- MORRISON, JOSEPH DERECK – ADRIEN, JEAN-MARIE, *Control Mechanisms in the Mosaic Synthesis Program*, in *Proceedings of the 1991 International Computer Music Conference*, San Francisco 1991, pp. 19-22.
- MORRISON, JOSEPH DERECK – ADRIEN, JEAN-MARIE, *Mosaic: A Framework for Modal Synthesis*, «Computer Music Journal», XVII (1993), pp. 45-56.
- La musica elettronica*, a cura di Henri Pousseur, con una prefazione di Luciano Berio, Feltrinelli, Milano 1976.
- Musical Haptics*, edited by di Stefano Papetti e Caharalampos Saitis, Springer, Berlin, 2018.
- NATTIEZ, JEAN-JACQUES, *Musicologia generale e semiologia*, a cura di Rossana Dalmonte, EDT, Torino 1989.
- NEUPERT, MAX – WEGENER, CLEMENS, *Isochronous Control + Audio Streams for Acoustic Interfaces*, in *Proceedings of the Linux Audio Conference (LAC-19)*, CCRMA, Stanford University, 2019, pp. 89-93.
- NEUPERT, MAX – WEGENER, CLEMENS, *Interacting with Digital Resonators by Acoustic Excitation*, in *Proceedings of the 16th Sound and Music Computing Conference (SMC 2019)*, Málaga 2019, 2 pp.
- NEZ, KETTY, *An Interview with Hans Tutschku*, «Computer Music Journal», XXVII (2003), pp. 14-26.
- NORDIN, HUD, *HighTech Heroes VI: Julius Smith and David Jaffe*, Montain View (US), 1983, in <<http://youtu.be/15jG1zfx-IM>> (accesso 12-12-2021).
- OLSON, HARRY FERDINAND, *Music, Physics, and Engineering*, 2^a ed, Dover, New York 1967.
- ORCALLI, ANGELO, *Complessità e non-linearità nel pensiero musicale contemporaneo*, «Sonus: materiali per la musica contemporanea», VIII (1996), pp. 27-34.
- ORLAREY, YANN – LETZ, STÉPHANE – FOBER, DOMINIQUE, *Faust: An Efficient Functional Approach to DSP Programming*, in *New Computational Paradigms for Computer Music*, a cura di Gérard Assayag e Andrew Gerzso, Delatour, Paris 2009.
- OVERHOLT, DAN – BERDAHL, EDGAR – HAMILTON, ROBERT, *Advancements in Actuated Musical Instruments*, «Organised Sound», XVI (2011), pp. 154-165.
- PALUMBI, MARCO – SENO, LORENZO, *Physical Modelling of Bowed Strings – a New Model and Algorithm*, in <http://www.acustica.org/metal_string.htm> (accesso 20-20-2020).

- PALUMBI, MARCO – SENO, LORENZO, *Physical Modeling by Directly Solving Wave PDE*, in *Proceedings of the 1999 International Computer Music Conference*, Beijing 1999 [4 pp.].
- PIZZALEO, LUIGI, *Alla ricerca di una chiave per l'infinito. Paradigmi originari della musica elettroacustica*, «Rivista DAT [divulgazione audiotestuale]», II (2018), pp. 87-106.
- POEPEL, CORNELIUS – OVERHOLT, DAN, *Recent Developments in Violin-related Digital Musical Instruments: Where Are We and Where Are We Going?*, in *Proceedings of the 2006 International Conference on New Interfaces for Musical Expression (NIME06)*, Paris 2006, pp. 390-395.
- POLFREMAN, RICHARD, *MfOM: a Library for Building and Controlling Physical Model Instruments in OpenMusic*, in *International Computer Music Conference Proceedings 2002*, pp. 436-439.
- PORCARO, NICK – PUTNAM, WILLIAM – SCANDALIS, PAT – STILSON, TIM – JAFFE, DAVID – SMITH III, JULIUS O. – VAN DUYN, SCOTT, *SynthBuilder and Frankenstein: Tools for the Creation of Musical Physical Models*, in <https://smartechnology.gatech.edu/bitstream/handle/1853/50815/PorcaroPutnam1996.pdf> (accesso 10-11-2021).
- POYNTING, JOHN HENRY – THOMSON, JOSEPH JOHN, *A Textbook of Physics: Sound 1900*, Charles Griffin, London 1900.
- PUCKETTE, MILLER, *Max at Seventeen*, «Computer Music Journal», XVI (2002), pp. 31-43.
- PUCKETTE, MILLER, *Pure Data: Another Integrated Computer Music Environment*, in *Proceedings of the Second Intercollege Computer Music Concerts*, Tachikawa 1996, pp. 37-41.
- RECK MIRANDA, EDUARDO, *Computer Sound Design: Synthesis Techniques and Programming*, Focal Press, Oxford 2002.
- REYES, JUAN, *Composing for the Physical Model of the Maraca*, in https://ccrma.stanford.edu/~juanig/articles/wadi-icmc/Model_Maracas.html (accesso 05-01-2021).
- REYES, JUAN, *Nota di sala su ppP*, in <https://www.fondation-langlois.org/html/e/oeu.php?NumEnregOeu=o00002307> (accesso 10-01-2021).
- REYES, JUAN, *Nota di sala su Wadi Musa*, in <https://ccrma.stanford.edu/~juanig/descripts/wadi.html> (accesso 05/01/2021).
- RISSET, JEAN-CLAUDE, *An Introductory Catalog of Computer Synthesized Sounds*, Bell Laboratories, Murray Hill, New Jersey 1969, ristampato nel 1995 come parte di *The Historical CD of Digital Sound Synthesis*, Wergo, WER 2033-2, tracce 18-45.
- RISSET, JEAN-CLAUDE, *Paradoxes de hauteur*, in *7th International Congress of Acoustics*, Budapest 1972, pp. 20S10-20S14.
- RISSET, JEAN-CLAUDE, *The Development of Digital Techniques: A Turning Point for Electronic Music?*, in *Rapports IRCAM 9/78*, Paris 1978.
- RISSET, JEAN-CLAUDE, *Computer Music Experiments 1964-...*, «Computer Music Journal», V (1985), pp. 11-18.
- RISSET, JEAN-CLAUDE, *Pitch and Rhythm Paradoxes: Comments on "Auditory Paradox Based on Fractal Waveform"*, «Journal of the Acoustical Society of America», DCCCXC (1986), pp. 961-962.
- RISSET, JEAN-CLAUDE, *Perception, environnement, musiques*, «In Harmonics», III (1988), *Les modalités de l'audition: pourquoi?*, in <http://articles.ircam.fr/textes/Risset88a/index.html>.
- RISSET, JEAN-CLAUDE, *Composer le son: experience avec l'ordinateur, 1964-1989*, «Contrechamps», XI (1990), pp. 107-126.

- RISSET, JEAN-CLAUDE, *Modelés physiques et perception - Modelés physiques et composition*, in *Modelés Physiques Creation Musicale et Ordinateur*, ACROE, Grenoble, ed. de la Maison des sciences de l'homme, 1990, vol. III, pp. 709-720.
- RISSET, JEAN-CLAUDE, *Le son numérique : une acoustique affranchie de la mécanique ?*, «Journal de Physique», IV (1992), 02 (C1), pp. C1-3-C1-11.
- RISSET, JEAN-CLAUDE — WESSEL, DAVID L., *Exploration of Timbre by Analysis and Synthesis*, in *The Psychology of Music*, edited by Diana Deutsch, The Academic Press, New York 1999, pp. 113-169.
- RISSET, JEAN-CLAUDE, *Fifty Years of Digital Sound for Music*, in *Proceedings SMC '07, 4th Sound and Music Computing Conference*, 11-13 July 2007, s. e., Lefkada 2007.
- RISSET, JEAN-CLAUDE, *Remarques de Jean-Claude Risset*, «Musica/Tecnologia», IV (2010), pp. 33-38.
- RISSET, JEAN-CLAUDE, *Computer Music: Why?*, Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, CNRS, Marseille s.a., p. [2]. <https://liberalarts.utexas.edu/france-ut/_files/pdf/resources/risset_2.pdf> (accesso 11-12-2020).
- ROADS, CURTIS, *The Computer Music Tutorial*, The MIT Press, Cambridge, MA 1996.
- ROADS, CURTIS, *Microsound*, The MIT Press, Cambridge, MA 2001.
- ROCCHESSE, DAVIDE, *The Ball Within the Box: A Sound Processing Metaphor*, «Computer Music Journal», XIX (1995), pp. 47-57.
- ROSSELLI, AMELIA, *Prime prose italiane* (1954), estratto in <https://medias.ircam.fr/media/old_archives/programnote/LO38017-01-wm.pdf> (accesso 7-11-2021).
- RUSSO, MARCO, *Problemi di organologia contemporanea: gli strumenti virtuali*, in *Il nuovo in musica*, a cura di Rossana Dalmonte e Francesco Spampianto, LIM, Lucca 2008, pp. 173-186.
- RUSSO, RICCARDO — SERAFIN, STEFANIA; MICHON, ROMAIN, ORLAREY, YANN — LETZ, STÉPHANE, *Introducing Finite Difference Schemes Synthesis in FAUST: A Cellular Automata Approach in SMC2021*, in *18th Sound and Music Computing Conference*, Torino 2021, pp. 11-18.
- SANCRISTOFORO, GIORGIO, *Triple Axis Modal Synthesis*, <<http://www.giorgiosancristoforo.net/2016/06/29/triple-axis-modal-synthesis/>> (accesso 15-01-2018).
- SENO, LORENZO, *Sintesi per modelli fisici. Verso una semantica dei suoni*. Introduzione al workshop *Musica e Scienza* 97, CMR, Roma 1997, in <http://www.acustica.org/sem_suoni.html> (accesso 11-12-2020).
- SENO, LORENZO, *Lo strumento virtuale. Implicazioni teoriche e pratiche nell'uso dei modelli fisici*, Intervento al Convegno *La Terra Fertile*, L'Aquila, settembre 1998, in <<http://www.acustica.org/publicat.htm>> (accesso 20-12-2020).
- SENO, LORENZO, *La sintesi del suono*. <<http://www.acustica.org/ex-mnt/sintesi/archetto.htm>> (accesso 20-12-2020).
- SERAFIN, STEFANIA, *The Exbow MetaSax: Compositional Applications of Bowed String Physical Models Using Instrument Controller Substitution*, «Journal of New Music Research», XXXI (2002), pp. 131-140.
- SERAFIN, STEFANIA — WILKERSON, CARR — SMITH III, JULIUS O., *Modeling Bowl Resonators Using Circular Waveguide Networks*, in *Proceedings of the 5th International Conference on Digital Audio Effects (DAFX-02)*, Hamburg 2002, pp. 1-5.

- SERAFIN, STEFANIA — KOJS, JURAJ, *The Voice of the Dragon: a Physical Model of a Rotating Corrugated Tube*, in *Proceedings of the 6th Int. Conference on Digital Audio Effects (DAFx-03)*, London 2003, [5 pp.].
- SERAFIN, STEFANIA, *The Sound of Friction: Real-Time Models, Playability and Musical Applications*, Ph.D. thesis, Stanford University, 2004.
- SERAFIN, STEFANIA — ERKUT, CUMHUR — KOJS, JURAJ — NILSSON, NIELS CHR.— NORDAHL, ROLF, *Virtual Reality Musical Instruments: State of the Art, Design Principles, and Future Directions*, «Computer Music Journal», XXXX (2016), pp. 22-40.
- SAITIS, CHARALAMPOS, *Physical Modeling of the Piano: An Investigation into the Effect of String*, Master thesis, Sonic Arts Research Centre School of Music and Sonic Arts Belfast 2008.
- SINCLAIR, STEPHEN — WANDERLEY, MARCELO M. — HAYWARD, VINCENT — SCAVONE, GARY, *Noise-Free Haptic Interaction with a Bowed String Acoustic Model*, in *Proceedings of the World Haptics Conference*, Istanbul 2011, s.n.p.
- SMALLEY, DENIS, *La spettromorfologia: una spiegazione delle forme del suono (I)*, «Musica/Realtà», L (1996), pp. 121-137.
- SMALLEY, DENIS, *Space-form and the Acousmatic Image*, «Organised Sound», XII, (2007), pp. 35-58.
- SMITH III, JULIUS O., *Physical Modeling Synthesis Update*, «Computer Music Journal», XX (1996), pp. 1-16.
- SMITH III, JULIUS O., *Synthesis of Bowed Strings*, in *Proceedings of the International Computer Music Conference*, San Francisco 1982, pp. 308-340.
- SMITH III, JULIUS O., *Techniques for Digital Filter Design and System Identification with Application to the Violin*, Ph.D. thesis, Stanford University 1983.
- SMITH III, JULIUS O., *Physical Audio Signal Processing for Virtual Musical Instruments and Audio Effects*, 2010, in <https://www.dsprelated.com/freebooks/pasp/digital_waveguide_models_i.html> (accesso 10-7-2021).
- SMITH III, JULIUS O., *Synthesis of Bowed Strings*, in *International Computer Music Conference Proceedings 1982*, pp. 308-340.
- SMITH III, JULIUS O., *Efficient Simulation of the Reed-bore and Bow-string Mechanisms*, in *Proceedings of the 1986 International Computer Music Conference*, The Hague 1986, pp. 275-280.
- SMITH III, JULIUS O., *Physical Modeling Using Digital Waveguides*, «Computer Music Journal», XVI (1992), pp. 74-91.
- SMITH III, JULIUS O., *Acoustic Modeling Using Digital Waveguide in Musical Signal Processing* edited by Curtis Roads, Stephen Travis Pope, Aldo Piccialli, Giovanni De Poli, Routledge, New York 1997, pp. 221-263.
- SMITH III, JULIUS O., *Musical Applications of Digital Waveguides*, in *Technical Report STAN-M-39*, Stanford University Department of Music, Stanford 1987.
- SMITH III, JULIUS O., *A New Approach to Digital Reverberation Using Closed Waveguide Networks*, in *Proceedings of the 1985 International Computer Music Conference*, Vancouver 1985, pp. 47-53.
- SMITH III, JULIUS O., *A History of Ideas Leading to Virtual Acoustic Musical Instruments*, in *IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics*, 2005, New Paltz 2005, pp. 299-306.
- SPENCER, GLENN, *Music Publishing and Music Representation in the Technological Age: A Symposium*, «Computer Music Journal», XVI (1992), pp. 96-98.

- STEEGE, BENJAMIN, *Helmholtz and the Modern Listener, Refunctioning the Ear*, Cambridge University Press, Cambridge 2012.
- STEVENS, KENNETH – KASOWSKI, STANLEY –FANT, GUNNAR, *An Electrical Analog of the Vocal Tract*, «Journal of the Acoustical Society of America», XXV (1953), pp.734-742.
- STEWART, JOHN QUINCY, *An Electrical Analogue of the Vocal Organs*, «Nature», CX (1922), pp. 311-312.
- STOCKHAUSEN, KARLHEINZ, *Musica elettronica e musica strumentale*, in *La musica elettronica*, testi scelti e commentati da Henri Pousseur, prefazione di Luciano Berio, Feltrinelli, Milano 1976, pp. 45-50.
- SULLIVAN, CHARLES R., *Extending the Karplus Strong Algorithm to Synthesize Electric Guitar Timbres with Distortion and Feedback*, «Computer Music Journal», XIV (1990), pp. 26-37.
- SCHWARZ, DIEMO, *Current Research in Concatenative Sound Synthesis*, in *Proceedings of the International Computer Music Conference (ICMC)*, Barcelona 2005, pp. 1-4.
- TACHE, OLIVIER, *Conception d'un instrumentarium pour la creation musicale a l'aide des modeles physiques Cordis-Anima. Modelisation et simulation*, Ph. D. thesis, Institut Polytechnique de Grenoble, Grenoble 2008.
- TARABELLA, LEONELLO, *Musica informatica. Filosofia, storia e tecnologia della computer music*, Apogeo, Santarcangelo di Romagna, 2014.
- TOMATIS, JACOPO, *Intervista ad Andrea Valle (07-11-2017)*, in <<https://www.giornaledellamusica.it/articoli/animismo-degli-oggetti-e-orchestre-elettromeccaniche>> (accesso 8-11-2021).
- TOPPER, DAVID – BURTNER, MATTHEW – SERAFIN, STEFANIA, *Spatio-Operational Spectral (S.O.S.) Synthesis in Proceedings of the 5th Int. Conference on Digital Audio Effects (DAFX-02)*, Hamburg 2002 [5 pp.].
- TORRA-MATTENKLOTT, CAROLINE, *Illusionisme musical: Jean-Claude Risset et l'esthétique de la musique électroacoustique*, «Dissonance», LXIV (2000), pp. 7-9.
- TRAUTMANN, LUTZ – RABENSTEIN, RUDOLF, *Digital Sound Synthesis by Physical Modeling using the Functional Transformation Method*, Kluwer Academic/Plenum Publishers, Boston 2003.
- TRESCH, JOHN – DOLAN, EMILY I., *Toward a New Organology: Instruments of Music and Science*, «Osiris», XXVIII (2013), pp. 163-185.
- TRUEMAN, DAN, *Reinventing the Violin*, Ph.D. Thesis, Princeton University, 1999.
- TRUEMAN, DAN – DUBOIS, LUKE, *PeRColate* (2005), <music.columbia.edu/PeRColate>; discusses Version 0.9b5. (accesso 20-11-2021).
- TRUEMAN, DAN – PERRY COOK, *BoSSA: The Deconstructed Violin Reconstructed*, «Journal of New Music Research», XXIX (2012), [9 pp.].
- TUTSCHKU, HANS, *Portfolio of Compositions*, Ph.D. thesis, The University of Birmingham, 2003.

- TYNDALL, JOHN, *Sound*, 3^a ed., The Werner Company, Akron, Ohio 1875.
- VÄLIMÄKI, VESA —TAKALA, TAPIO, *Virtual Musical Instruments – Natural Sound Using Physical Models* «Organised Sound», II (1996), pp. 75-86.
- VÄLIMÄKI, VESA, *Physics-Based Modeling of Musical Instruments*, «Acta Acustica united with Acustica», XC (2004), pp. 611-617.
- VÄLIMÄKI, VESA —PAKARINEN, JYRI —ERKUT, CUMHUR —KARJALAINEN, MATTI, *Discrete-time Modelling of Musical Instruments*, «Report on Progress in Physics», LXIX (2006), pp. 1-78.
- VAN STIEFEL — TRUEMAN, DAN—COOK, PERRY, *Re-coupling: The uBlotat Synthesis Instrument and the sHowl Speaker-Feedback Controller*, in *Proceedings of the 2004 International Computer Music Conference* (ICMC 2004), Miami 2004 [9 pp.].
- VARELA, FRANCISCO J.— ROSCHT, ELEANOR— THOMPSON, EVAN, *The Embodied Mind Cognitive Science and Human Experience*, The MIT Press, Cambridge and London, 1991.
- VARÈSE EDGARD — WEN-CHUNG, CHOU, *The Liberation of Sound*, «Perspectives of New Music», V (1966), pp. 11-19
- VERPLANK, BILL— MATHEWS, MAX — ROBERT SHAW, *Scanned Synthesis*, in *Proceedings of the International Computer Music Conference*, Berlin 2000 [4 pp.].
- VILLENEUVE, JÉRÔME— CADOZ, CLAUDE — CASTAGNÉ, NICOLAS, *Visual Representation in GENESIS as a Tool for Physical Modeling, Sound Synthesis and Musical Composition*, in *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression*, Baton Rouge 2015, pp. 195-200.
- WANG, GE - COOK, PERRY A., *Chuck: A Concurrent, On-the-Fly, Audio Programming Language*, in *Proceedings of the International Computer Music Conference*, Singapore 2003, pp. 1-8.
- WILLIAM, JOHN — RAYLEIGH, STRUTT BARON, *The Theory of Sound*, 2 voll., Cambridge University Press, Cambridge 2011 (1^a ed. 1877).
- WISHART, TREVOR, *Sound Symbols and Landscapes*, in *The Language of Electroacoustic Music*, a cura di Simon Emmerson, London, Macmillan, 1986, pp. 41-60.
- WISHART, TREVOR, *On Sonic Art*, Harwood Academic Publishers, Amsterdam 1996.
- YAREMCHUK, VANESSA —BRUM MEDEIROS, CAROLINA — WANDERLEY, MARCELO M., *Small Dynamic Neural Networks for Gesture Classification with The Rulers (a Digital Musical Instrument)*, in *Proceedings of the 19th International Conference on New Interfaces for Musical Expression*, Baton Rouge 2015, pp. 150-155.
- YOUNG, JOHN, *Imagining the Source: The Interplay of Realism and Abstraction in Electroacoustic Music*, «Contemporary Music Review», XV (1996), pp. 73-93.
- VALLE, ANDREA — LANZA, MAURO, *Systema Naturae: Shared Practices Between Physical Computing and Algorithmic Composition*, in *Proceedings of the 14th Sound and Music Computing Conference*, Aalto University, Espoo 2017, pp. 391-398;
- VALLE ANDREA, *Burger Time ou les Tentations de saint Antoine, or Not Wanting to Say Anything About Mauro Lanza, Gustave Flaubert and Peter Pepper*, «Flaubert [En ligne]», XXI (2019), mis

en ligne le 01 juin 2019, consulté le 08 novembre 2021. URL:
<<http://journals.openedition.org/flaubert/3650>>.

—VARELA, FRANCISCO J.—ROSCHT, ELEANOR—THOMPSON, EVAN, *The Embodied Mind Cognitive Science and Human Experience*, The MIT Press, Cambridge and London, 1991.

—ZICARELLI, DAVID D., *An Extensible Real-time Signal Processing Environment for Max*, in *International Computer Music Conference Proceedings 1998*, s.n.p. [4 pp].

UNIVERSITÉ DE TOURS UNIVERSITÀ DI PAVIA

ÉCOLE DOCTORALE : Humanités & Langues – H&L

Laboratoire : CESR – Ricercar

DIPARTIMENTO DI MUSICOLOGIA E BENI CULTURALI

THÈSE présentée par :

Nicoletta ANDREUCCETTI

soutenue le : 24 septembre 2022

pour obtenir le grade de : **Docteur de l'Université de Tours et Dottore di ricerca de l'Università di Pavia**

Discipline / Spécialité : Musicologie / Scienze del testo letterario e musicale

Comporre con i modelli fisici tra astrazione e realismo

Strumenti, pratiche e linguaggi del virtuale: una ricognizione e tre casi di studio (Lupone, Kojs, Lanza)

Composer avec des modèles physiques entre abstraction et réalisme

Instruments, pratiques et langages du virtuel : une enquête et trois études de cas (Lupone, Kojs, Lanza)

THÈSE dirigée par :

M. CANGUILHEM Philippe
Mme PUSTIJANAC Ingrid

Professeur, Université de Tours
Professeure, Università di Pavia (Italie)

RAPPORTEURS :

Mme SERAFIN Stefania
M. TIFFON Vincent

Professeure, Université de Aalborg (Danemark)
Professeur, Aix-Marseille Université

JURY :

M. CANGUILHEM Philippe
Mme PUSTIJANAC Ingrid
Mme SERAFIN Stefania
M. TIFFON Vincent

Professeur, Université de Tours
Professeure, Università di Pavia (Italie)
Professeure, Université de Aalborg (Danemark)
Professeur, Aix-Marseille Université

INVITÉ :

M. LANZA Mauro

Universität der Künste, Berlin (Allemagne)

Introduction

Jusqu'à la fin des années 1970, la pratique de la *modélisation physique* (*Physical Modeling* approach, PM) en acoustique musicale consistait à rechercher une meilleure compréhension des mécanismes des instruments réels par la conception de modèles précis et complexes. La simulation a été principalement utilisée pour étudier la validité du modèle d'une structure sonore spécifique, en comparant les résultats avec les mesures de la structure réelle, par le biais d'une analyse auditive et de signaux. Depuis lors, des recherches dont les objectifs et les utilisations sont davantage axés sur la musique se sont développées et, à partir des années 1990, elles ont été appelées "*modélisation fondée sur la physique*" (*Physically-Based Modeling*, PBM) ou synthèse, par opposition à la modélisation physique traditionnelle. Tout en partageant des objectifs communs avec ces derniers, la PBM vise à trouver des règles physiques appropriées, des algorithmes modulaires réutilisables, des langages fondés sur la physique ou des outils intégrés pour amplifier le potentiel créatif du musicien, tant en termes de qualité sonore que de convivialité, l'objectif idéal étant de construire des instruments virtuels aussi jouables que des instruments réels.

Comme l'approche adoptée par cette recherche se situe dans cet horizon, le défi est d'essayer de reconnaître où les objectifs de la PM et de la PBM se chevauchent et, lorsqu'ils sont axés sur les résultats musicaux, de donner la priorité aux détails liés aux timbres, aux comportements et à leurs interactions. Ainsi, dans le présent travail, l'expression "modélisation physique" fera référence, sans autre spécification, aux procédures caractérisées par l'accent mis sur la modélisation des propriétés les plus significatives de certains mécanismes de génération du son du monde réel dont le signal sonore est extrait.

Dans tous les cas, la modélisation physique — par opposition à l'approche par le traitement du signal, qui se concentre sur la modélisation des propriétés acoustiques du son tel qu'il est perçu — consiste à simuler la mécanique de la production du son par l'imitation du comportement de l'objet qui produit un son donné, ramenant ainsi à la physicalité du monde matériel constitué par les objets qui émettent le son et les milieux dans lesquels il se propage. En effet, grâce à la possibilité de concevoir la mécanique du son dans le domaine du numérique, le concepteur et/ou le musicien accèdent à la

structure interne d'objets/instruments physiques virtuels, en modélisant directement l'interaction de structures mécaniques simples qui, par nature, produisent des séquences et des *textures* sonores aux propriétés internes organiques. En ce sens, les musiciens peuvent réaliser des conditions d'émission et de contrôle du son qui, bien qu'irréalisables dans le monde réel, restent dans le domaine des modes intuitables ou imaginables, dans une représentation mentale physique du son, plutôt que dans une représentation mentale abstraite, donnant naissance à un *corpus* de lutherie numérique qui redéfinit la nature même du concept d'instrument.

Dans l'analyse de la littérature qui utilise des modèles physiques, le *medium* technologique ne se révèle pas neutre et n'appartient pas au monde de l' 'instrumentalité' traditionnelle, mais, en tant que porteur de valeurs, il entre dans un dialogue profond avec l'identité de l'œuvre elle-même, contribuant à un dévoilement réciproque. Ainsi, le moyen entre dans la fin et, inversement, la fin se constitue dans le moyen, à travers une relation qui transcende toute polarisation dualiste et dans laquelle le quoi correspond au comment.

Puisque l'instrument et la pensée compositionnelle se redéfinissent mutuellement en rendant concevables et réalisables les processus mêmes de création, il s'ensuit qu'une analyse précise de la nature de la contribution spécifique que les instruments virtuels apportent à la redéfinition de l'action compositionnelle au sein de cette dialectique est nécessaire. L'objectif de cette recherche sera donc d'étudier l'interrelation entre les formalismes du domaine numérique, qui construisent le modèle, l'implémentation de cet objet, qui devient un instrument de musique, et les processus de composition.

Bien que la période examinée s'étende sur un intervalle de temps qui commence avec l'expérimentation des premières techniques de modélisation dans les années 1970 et se termine avec les nouveaux langages d'aujourd'hui, afin de témoigner de cette interrelation, la recherche s'est concentrée sur la partie centrale de cette période chronologique – en gros du milieu des années 1980 à la première décennie du XXI^e siècle – dans laquelle les formalismes de la modélisation physique sont mûrs pour être utilisés dans la sphère créative. Dans ce sens, nous sommes limités à traiter spécifiquement, dans les études de cas, des expériences compositionnelles liées de toute façon à

l'utilisation de partitions, bien que de nature différente, laissant à des études ultérieures une lecture plus précise des solutions plus nettement improvisées ou, encore, liées à l'utilisation, à des fins créatives, d'environnements virtuels immersifs et interactifs.

Compte tenu de la nature particulière de cette recherche, l'identification du corpus de sources et de la littérature secondaire apparaît particulièrement problématique. Pour cette raison, la typologie des sources primaires et de la littérature secondaire sera définie en détail pour chaque chapitre.

Dans le premier chapitre, consacré à l'analyse du développement des techniques de modélisation physique, les sources primaires sont les contributions – généralement écrites par ceux qui conçoivent les modèles, parfois en collaboration avec des musiciens – qui concernent essentiellement la formalisation de solutions de conception spécifiques. Il s'agit d'études très techniques portant sur des cas de modélisation délimités et circonscrits, généralement publiés dans les actes des conférences des associations internationales d'informatique musicale, ou dans les rapports des différents centres de recherche CCRMA ; IRCAM ; ACROE. Les contributions de ceux qui les ont développés, tels que Julius O. Smith III, dont les écrits témoignent de son interaction avec l'algorithme de Karplus-Strong et McIntyre-Schumacher-Woodhouse ; sur la synthèse modale implémentée dans Mosaic, fusionné ensuite en Modalys, par Joseph Dereck Morrison et Jean-Marie Adrien ; sur *PhISM*, par Perry Cook ; sur le paradigme de l'interaction de masse, par les chercheurs du centre ACROE, dirigé par Claude Cadoz ; sur le Synthesis ToolKit, par Cook ; sur le langage de programmation Functional AUdio STreaming (FAUST), par Smith III et Romain Michon. Bien entendu, il ne s'agit là que des premiers exemples, d'un point de vue chronologique, d'un vaste corpus de sources, allant jusqu'à nos jours, auquel il sera fait référence au cours du chapitre correspondant.

Outre ces sources primaires, il existe un groupe important, bien que limité, de sources secondaires qui témoignent du désir d'une réflexion plus large sur la nature des différentes approches de la modélisation physique, notamment les contributions de Vesa Välimäki, Gianpaolo Borin et al, Stefan Bilbao, Eduardo Reck Miranda, Curtis Roads, Cadoz et Nicolas Castagné, ainsi que les contributions de Jean-Claude Risset sur la psychoacoustique.

En ce qui concerne le deuxième chapitre, les sources primaires sont toujours constituées de la même typologie que celle utilisée pour le premier chapitre, étudiée cette fois-ci davantage du côté des pratiques découlant des différents types de modélisation, auxquelles s'ajoute un éventail hétérogène de sources constitué des partitions des pièces, lorsqu'elles sont utilisées, des programmes de concerts et des communications personnelles des auteurs. À ces sources s'ajoutent des articles écrits directement par les auteurs (Chris Chafe, Perry Cook, Matthew Burtner, Castagné et Cadoz), ou en symbiose entre les chercheurs qui conçoivent le modèle et les compositeurs qui l'utilisent (Juraj Kojs-Stefania Serafin, Burtner-Serafin), et des thèses de doctorat dans lesquelles les auteurs/compositeurs parlent de leurs œuvres (Kojs, Dan Trueman).

Les sources secondaires sont constituées des premières contributions, bien que très partielles, qui relient les techniques à la littérature, parmi lesquelles nous mentionnons ici un court article de Chafe, et la contribution fondamentale sur la classification des instruments virtuels de Chafe, Kojs et Serafin, classification qui a également été utilisée pour structurer la base de données de la littérature musicale, dont nous parlerons plus loin. En ce sens, notre lecture du rôle et de la fonction de ces instruments a été contextualisée par le recours à la méthodologie de l'*organologie critique*, qui redéfinit les critères de l'organologie traditionnelle en s'ouvrant à l'étude de tous les types d'*objets sonores*. Vous trouverez plus de détails sur ces aspects dans l'introduction du deuxième chapitre.

Quant au troisième chapitre, les sources primaires sont constituées par les partitions des œuvres traitées, ainsi que par les articles et les interventions, sous diverses formes, des compositeurs sur leur travail, dont ceux de Kojs, Mauro Lanza, Michelangelo Lupone et Cadoz. Les sources secondaires sont constituées des interventions qui ont contribué à définir le cadre méthodologique et interprétatif de référence pour la conceptualisation des aspects inhérents à la pensée compositionnelle, ainsi que pour la réalisation d'œuvres construites avec des modèles physiques : le concept de lien avec la source, par Denis Smalley ; *embodied cognition*, par Marc Leman et Arnie Cox ; le concept de *plausibilité*, par Castagné ; le processus de métaphorisation, par Cadoz. Ces concepts formulés en relation avec des objets particuliers ont été, en même temps, redéfinis et remodelés en fonction de ma réinterprétation personnelle et

globale du phénomène à travers lequel l'acte de composition est reconsidéré à la lumière des techniques de modélisation physique, objet de ce chapitre de conclusion.

Si, d'une part, comme nous l'avons vu, la recherche informatique sur la modélisation physique apparaît comme un corpus vaste et en constante redéfinition, d'autre part, dans l'état actuel de la littérature existante, l'apport historico-musicologique et analytique concernant le répertoire des modèles physiques apparaît très limité, et, de plus, la réflexion esthétique qui en découle ne semble pas suffisamment développée. A cet égard, outre les contributions déjà mentionnées ci-dessus, qui abordent ces questions de manière très partielle et indirecte, il convient de signaler la thèse de doctorat d'Aline Hufschmitt, qui contient un excursus des techniques jusqu'à l'an 2000 avec de courtes interviews de compositeurs sur des pièces spécifiques, et la thèse de maîtrise de Romain Michon, qui présente des pièces utilisant la synthèse par guide d'ondes. La thèse de Hans Tutschku et celle de Michaël Dzjaparidze se concentrent sur un portefeuille de compositions réalisées par les auteurs eux-mêmes, tout comme les thèses de doctorat d'Olivier Tache et de Giuseppe Gavazza, qui illustrent leurs propres pièces composées à l'aide du langage Cordis-Anima.

Enfin, la thèse de Kojs, bien qu'elle soit aussi largement centrée sur la discussion de ses propres compositions, développe des considérations intéressantes sur les processus perceptifs, à commencer par l'application de la théorie de la perception écologique de James J. Gibson à la dimension auditive.

Puisque l'un des objectifs de cette recherche est l'étude systématique des œuvres produites à l'aide de la technologie décrite, une première étape a consisté à cartographier le répertoire. À cet égard, une première tentative de recensement a été réalisée, comme déjà mentionné, par Kojs, qui a commencé à cataloguer un corpus de compositions utilisant les modèles physiques, jusqu'en 2008. La base de données – qui contient des informations précises sur la méthodologie de synthèse utilisée pour chaque composition, le type d'instrument modélisé et l'ensemble – a été complétée, développée et étendue chronologiquement par l'auteur, mais dans les limites de la traçabilité des données. Ce recensement a confirmé, sur une période plus large, la fortune de certaines techniques plus faciles à mettre en œuvre et d'autres plus susceptibles d'être utilisées, de préférence dans des centres de recherche, ainsi que la fortune de mises en œuvre de plus en plus faciles d'accès pour une utilisation créative

propre aux musiciens. Les résultats de cette intégration sont présentés dans l'annexe du chapitre II.

La compilation de la base de données avec les compositions dans lesquelles la technique de synthèse par modèles physiques est présente a immédiatement mis en évidence, d'une part, l'hétérogénéité des études de cas, et d'autre part, certaines lignes communes. Il s'est donc avéré nécessaire, dans un premier temps, de procéder à un examen systématique de la littérature scientifique relative à la synthèse par modèles physiques, qui témoigne, d'une part, de l'absence d'une réflexion systématique sur les implications compositionnelles de l'utilisation de ces nouveaux outils et, d'autre part, de l'absence d'une étude globale de la redéfinition des processus perceptifs et de l'écoute favorisés par la mise en œuvre créative d'outils virtuels dans les procédures compositionnelles : ce qui apparaît donc comme quasi inexistant, c'est la reconstruction d'une image globale, qui constitue, au contraire, l'un des objectifs premiers de ce travail.

Par conséquent, étant donné la nature dispersée et très hétérogène des sources, il sera nécessaire de préparer, tout d'abord, une reconnaissance qui délimite notre objet d'étude, en articulant cette mise en forme selon trois lignes interactives : les techniques de modélisation utilisées dans les processus de création de modèles, les effets organologiques et performatifs de leur constitution en un corpus d'instruments, et la reconstruction du répertoire correspondant. Bien que ces trois domaines puissent paraître complètement différents, ils constituent, pour la présente recherche, un seul objet aux facettes différentes, idéalement articulées en trois temporalités organiquement corrélées : modèle, instrument, œuvre.

Si, d'une part, il apparaît nécessaire d'étudier en profondeur les propriétés émergentes du modèle qui découlent des différentes techniques de modélisation, tout comme il est nécessaire d'étudier la nature spécifique du potentiel performatif et du répertoire qui en découle d'autre part, le défi consiste à identifier la trame qui articule la complexité de cette image globale, dans laquelle chaque aspect est organiquement lié. Afin d'éviter toute logique de simplification et de séparation, nous tenterons de proposer des pistes d'investigation non pas centrifuges mais centripètes. Notre objet d'étude sera donc analysé à la lumière des échanges continus, des interrelations continues qui rendent significative sa restitution phénoménologique en tant que système complexe, essentiellement hybride entre numérique et analogique, entre

virtuel et réel, entre formalisation scientifique et artistique, entre langage technique et musical.

Dans le premier chapitre, nous avons essayé d'étudier le contexte et les questions sous-jacentes qui ont rendu possible l'intégration des techniques de modélisation physique dans le domaine musical, à travers des processus de redéfinition et de raffinement mutuels qui ont renforcé l'effet performatif. Nous avons donc procédé à l'exposé des particularités et du développement de l'approche de la modélisation physique dans le contexte plus large de la recherche musicale depuis les années 1960, moment crucial où l'émergence du paradigme de la source – fondé sur la représentation du mécanisme de production du son, la cause plutôt que l'effet. Ce développement croise les questions liées à la redéfinition du timbre à travers les catégories de la perception, questions qui étaient déjà présentes dans le domaine de la musique électronique pure, et que le passage même des langages de synthèse analogiques aux langages numériques avait, à son tour, redéfini. La prise de conscience de la relation entre la manière dont notre perception reçoit les propriétés du son et les causalités dont ces dernières émanent, deviendra donc, entre les années 60 et 70, le fondement même de la synthèse sonore fondée sur la physique.

A partir de la recherche de la spécificité de la nature de la modélisation physique dans le domaine musical, nous avons procédé à la description des principales méthodes, en nous concentrant, pour chacune d'entre elles, sur les différentes particularités de la construction du modèle, afin de mettre en évidence la représentation conceptuelle sous-jacente au modèle lui-même, qui se reflète à son tour, comme nous le verrons en détail dans le deuxième chapitre, dans l'identité différente des instruments. L'excursion historique de ces formalismes a également permis, dans le cadre de l'imbrication naturelle entre les pratiques de conception de modèles et les processus de création musicale, de reconstituer les modes de développement et de consolidation, entre la fin des années 1970 et le début des années 1990, et le passage progressif, dans les décennies suivantes, des laboratoires des centres de recherche aux studios privés des compositeurs. Ce passage s'est produit grâce à la prolifération de la mise en œuvre de techniques au sein d'environnements de programmation dédiés aux applications musicales, visant à élargir le champ d'opérativité des nouveaux instruments et à développer leurs capacités performatives. Afin de témoigner de leur évolution, il a été

jugé nécessaire de prolonger l'analyse jusqu'à nos jours, en traçant, à grands traits, les frontières technologiques à l'intérieur desquelles se situe notre objet de recherche.

Après avoir reconstruit la sphère des techniques de conception de modèles, avec ses interrelations avec le monde de la créativité musicale, le deuxième chapitre étudie les modèles physiques du point de vue de leur identité en tant qu'instruments virtuels, en essayant de mettre en évidence les particularités performatives spécifiques découlant des différentes techniques de modélisation. À un type de production qui évolue plus purement dans la sphère de la réplcation – un domaine privilégié, par exemple, par les études sur l'acoustique, ou par les applications commerciales – est directement liée la production qui constitue le centre de cette recherche, celle qui dérive de l'altération de la réplcation virtuelle, plus proprement liée à la sphère artistique.

Les différents types de modélisation des outils virtuels sont ici empruntés à la classification proposée par Juraj Kojs, Stefania Serafin et Chris Chafe, s'articulant en outils étendus, hybrides ou abstraits, selon la déclinaison de différents niveaux de distanciation par rapport aux outils réels. À la connaissance de l'auteur, cette typologie n'a pas été directement adoptée par la musicologie, bien qu'elle puisse indirectement s'inscrire dans les perspectives développées par l'organologie critique, auxquelles nous avons fait allusion précédemment.

Une telle structuration, bien qu'elle risque de ne pas refléter pleinement l'évolution actuelle des applications des techniques de modélisation, qui sont en redéfinition continue et rapide (§ 2.3), est stratégique pour l'un des objectifs fondamentaux de ma recherche, qui consiste à réfléchir et à témoigner la conceptualité sous-jacente qui lie la représentation du modèle à sa réalisation concrète dans l'"instrument", en particulier par rapport au répertoire analysé. Cette classification sera utile dans le troisième chapitre, puisqu'elle rendra compte de la mesure dans laquelle l'articulation — réplique/extension, instrument hybride ou complètement abstrait — qui marque la distanciation progressive du réel, permet d'analyser les processus perceptifs et métaphoriques, nécessaires pour comprendre le rôle et la fonction des instruments virtuels dans l'acte de composition.

Le lien conceptuel est nécessaire car il assure la conjonction entre la représentation (mentale) de l'objet/instrument qui sous-tend la construction du modèle

et sa transformation en outil, avec ses particularités spécifiques. L'outil interagira donc avec différentes pratiques, y compris celles consolidées dans le monde réel, pour être à son tour redéfini, dans un espace opérationnel virtuel complètement libéré des limites de la physicalité.

En partant des trois catégories d'instruments virtuels, ma contribution originale a consisté à procéder à une contextualisation de l'utilisation du modèle, en reconstruisant, pour chaque typologie, la rechute immédiate dans la sphère idéationnelle-compositionnelle, afin de témoigner d'un aspect fondamental de ma recherche, qui consiste à éclairer la relation indissoluble qui se constitue entre la nature du modèle, la typologie d'instrument avec ses pratiques performatives corrélées, et la contextualisation de ces dernières dans la dimension idéationnelle.

Si, en fait, dans le troisième chapitre, nous viserons plus spécifiquement et avec une perspective différente, à esquisser les processus et les langages compositionnels découlant de la spécificité des instruments virtuels, dans ce chapitre, l'intention consistera plutôt à étudier l'identité du modèle en tant qu'instrument, non pas dans le domaine direct de la programmation, mais plutôt dans celui dérivé des pratiques musicales. C'est précisément la reconstruction d'une telle image globale élaborée dans la relation entre les types de techniques et les processus compositionnels qui constitue un aspect pertinent et original de ma recherche et qui a été réalisée au prix d'un long travail de reconstruction et d'exégèse des sources.

Afin de reconstruire une image globale des répercussions performatives des différents modèles, on suivra ce premier aperçu du répertoire constitué autour des différents types d'instruments virtuels — dans le but non pas d'une reconnaissance sommaire mais plutôt de reconstruire le contexte qui redéfinit l'identité même des instruments — cette étape sera suivie d'une analyse spécifique d'une sélection d'instruments virtuels — afin de vérifier, en détail, leur potentiel d'exécution spécifique. Cette analyse sera stratégiquement liée à l'aspect fondamental de l'élaboration d'interfaces permettant de gérer le système interprète-instrument, pour la même mise en œuvre du modèle. Le choix des outils analysés reflète, d'une part, leur pertinence par rapport à leur utilisation dans des compositions particulièrement représentatives du panorama de l'utilisation des maquettes physiques et, d'autre part, le caractère fragmentaire et dispersé des sources disponibles. Dans ce sens, on a surtout essayé de

donner une description de la multiplicité des effets performatifs et des configurations du système maquette/interface/œuvre, ce dernier devant être compris dans toute la diversité et la fluidité des configurations possibles : de l'œuvre acousmatique, à l'œuvre mixte, à l'installation multimédia, etc.

Enfin, le troisième chapitre tentera de mettre en lumière la dialectique entre l'instrument/le geste virtuel/le processus compositionnel, en soulignant à quel point l'instrumentalité entre dans la sphère de l'idéation et de l'articulation linguistique avec des perspectives et des résultats toujours différents, dans un contexte où la pratique compositionnelle et la recherche technologique se développent dans l'étroite interrelation du langage et du modèle. L'analyse des œuvres permettra d'observer comment les instruments virtuels — dans les différents degrés d'éloignement de la réalité, jusqu'à l'abstraction totale — ouvrent une multiplicité de formalisations et d'horizons idéationnels.

Dans la constitution d'un espace compositionnel 'autre', l'abstraction et le réalisme représentent les extrêmes d'un *continuum*, interprétable selon le concept de 'plausibilité du son', dans lequel toutes les compositions analysées finissent par graviter. Le concept de plausibilité, introduit dans ce domaine par Nicolas Castagné et Claude Cadoz au début des années 2000, permet de conceptualiser ce réalisme ou cette vraisemblance auditive nécessaire pour amener l'auditeur à croire que le son, aussi 'autre' et inhabituel soit-il, a néanmoins été produit au moyen d'une source physique.

Bien que toute technique de synthèse puisse idéalement produire des sons plausibles, les techniques de modélisation physique produisent des sons naturellement plausibles, car, même s'ils ne sont pas nécessairement conçus en référence à un objet réel, ils émanent de l'activation d'un processus physique, et donc d'une gestualité immanente, qui nous permet de penser le contrôle de l'instrument simulé à travers les mêmes paramètres que ceux utilisés pour le contrôle de l'instrument réel. Dans l'espace du plausible, les différents gestes inhérents au modèle — étendus, hybrides et abstraits — ont été lus selon les différents niveaux de subrogation du geste, développés par Smalley. Ces niveaux codent, à travers le concept de *liaison à la source*, les différents niveaux de distanciation par rapport aux sons connus, en degrés croissants d'incertitude et de distance par rapport à la réalité, jusqu'au niveau d'abstraction maximale qui est lié, cependant, à une dimension primordiale des gestes : et c'est précisément en vertu

de cette gestualité primordiale, non encore expressément musicale, qu'il est possible de maintenir dans l'espace du plausible même le geste le plus abstrait produit par la modélisation.

Cette lecture est étayée par des études en psychologie de la perception musicale, et en particulier par le modèle développé par Marc Leman qui montre comment les processus d'action/perception peuvent *disambiguate* les relations stimulus-source rencontrées dans l'environnement, démontrant comment l'expérience musicale doit être insérée dans une dynamique de contraintes multiples qui, s'influençant les unes les autres, constituent une dialectique complexe d'interactions culturellement médiatisées. Ce modèle sera encore éclairé par la structuration des processus d'écoute selon les concepts d'imitation et de métaphore, en vertu desquels la cognition musicale ne peut ignorer ni l'action motrice mimétique (active ou imaginée) ni les processus métaphoriques. Selon différents degrés d'interrelation, la métaphore peut, en effet, atteindre un niveau d'abstraction complet, dans lequel les gestes modélisés agissent comme des stimuli perceptifs qui, partant de la nature matérielle du son, réunissent, même dans l'incertain, le lien avec le monde de l'expérience. Ainsi, le compositeur, agissant avec des instruments virtuels, se place dans le *continuum* de plausibilité dans lequel l'action métaphorique se déroule selon une proportionnalité inverse, s'intensifiant dans la tension vers l'abstrait et se réduisant dans le retour à la concrétude du réel. Il en résulte que l'espace compositionnel qui se construit au sein de ce *continuum* est par nature un espace fluide, liquide, dans lequel la dialectique entre réalité et virtualité se constitue en une chaîne potentiellement infinie d'interrelations qui, paradoxalement, sont toutes ancrées dans le domaine de la sensorialité.

Dans cet espace composé de multiples potentialités, trois renversements possibles ont été choisis, consistant en trois études de cas qui représentent idéalement la diversité des solutions, de la planification et des résultats linguistiques qui sous-tendent l'utilisation de modèles physiques. Leur point commun est la notion de nécessité qui, dans les trois cas, rend l'utilisation de cette technique structurelle. Par conséquent, un regard sur les œuvres de Michelangelo Lupone, Juraj Kojš et Mauro Lanza mettra en évidence trois différentes déclinaisons possibles du virtuel à l'intérieur de l'espace compositionnel, dans l'hypothèse de vérifier l'occurrence d'une virtualisation progressive, à long terme, de l'ensemble du processus créatif qui, partant

idéalement de la synthèse du son (modèle du signal), arrive à la synthèse des instruments et des gestes (modèle de la source), jusqu'à l'accès à la dimension idéationnelle. En ce sens, la synthèse par des modèles physiques pourrait constituer l'une des jonctions fondamentales, au sein d'un cheminement plus général, qui favorise une sorte de renversement de perspective de l'action compositionnelle.

On fait également l'hypothèse que les trois cas examinés ici témoignent de la manière dont le processus de virtualisation correspond, inversement, à un processus de réactualisation, puisque les formalisations mises en œuvre relèvent du domaine du monde physique auquel elles s'adressent idéalement. Il s'ensuit que, dans la rencontre des articulations sonores du monde virtuel avec celles du monde réel, une réalité hybride pourrait être créée, lue, à son tour, comme une métaphore de l'hybridation de l'homme et de la machine, d'où pourrait émerger une 'esthétique de l'inattendu' à travers la relation avec la technologie.

Corda di metallo de Michelangelo Lupone étudiera la possibilité de créer une circularité idée-technique-langage, dans laquelle la technique elle-même peut dévoiler quelque chose qui est *in nuce* dans de l'idée initiale du compositeur, se redéfinissant, dans ce cas, précisément dans sa rencontre avec le monde de la technologie. Le cas de Kojs, en revanche, permettra d'observer comment, à travers la modélisation physique, nous pouvons remonter à une sorte de degré zéro pré-linguistique, en extrapolant un vocabulaire d'actions capable de conjuguer, *ab origine*, les deux domaines, le physique et le virtuel. Puisque l'objet musical ne peut être défini, selon les théories psychologiques de la matrice fonctionnaliste, en faisant abstraction des comportements humains utilisés pour exprimer, représenter ou construire des formes sonores, il serait possible de lire le travail de Kojs comme une sorte de métalangage gestuel qui explore et expérimente des actions performatives projetées à la fois dans le monde physique et dans le monde virtuel, d'où pourrait naître une expressivité entièrement fondée sur les actions.

La dernière étude de cas permettra de vérifier l'hypothèse selon laquelle, à partir des langages du monde virtuel, Lanza peut créer des instruments idiomatiques qui lui permettent de déclencher des procédures capables de traverser tous les différents matériaux, tous les différents objets, dans une interrelation qui unit le réel et le virtuel

dans un artefact unique à partir duquel peut naître un élargissement radical du concept même d'instrument, qui devient en même temps un objet complètement fluide et déterritorialisé.

Afin de vérifier ces hypothèses, il est nécessaire d'étudier comment les modèles physiques s'intègrent dans la production examinée, dans les différents lieux possibles de la praxis exécutive et compositionnelle entre la dimension idéationnelle et de l'instrumentalité, par lesquels le virtuel entre dans la créativité artistique.

En conclusion, l'objet même de cette recherche ne peut être défini qu'à travers une vision globale, car il ne peut être lu dans l'abstraction de sa formalisation algorithmique, mais plutôt dans la concrétisation de son devenir instrument, avec la corrélation nécessaire d'un mécanisme qui, devenant un geste, entre pleinement dans les processus de création musicale. Il s'ensuit que seule une approche transdisciplinaire permettra de saisir le réseau complexe de relations multidimensionnelles par lequel ce dernier se constitue proprement dans un objet d'étude conçu dans la tension entre virtuel et réel. L'enquête s'est donc déroulée sous le signe de l'équilibre nécessaire qui permet de restituer une vision globale dans laquelle la profondeur et la largeur du regard pourraient tenter de livrer, dans les interactions des voies de signification possibles, une redéfinition cognitive complète de l'objet, en essayant de révéler le quoi, le comment et le pourquoi : trois termes qui, dans une synthèse extrême, déclarent les motivations sous-jacentes qui, d'une part, légitiment l'existence des trois chapitres dans lesquels s'articule ce travail et, d'autre part, témoignent qu'aucun des trois ne pourrait exister indépendamment des deux autres.

Chapitre I

Modélisation physique pour la synthèse sonore

1.1 Introduction

Dans le premier chapitre, nous étudions le développement du modèle de la source, un changement de paradigme fondamental à l'origine des techniques de modélisation physique de la production sonore. Cette technique s'est développée en relation avec les études de psychoacoustique, qui ont mis en évidence la dynamique de la perception du son, en notant combien celle-ci était idéalement liée, même au sein de processus très formalisés et abstraits, à l'origine matérielle supposée de la production du son. En ce sens, la modélisation physique est un outil permettant de passer d'un phénomène perçu à sa cause, à sa raison sous-jacent. Si, en effet, les techniques de synthèse fondées sur le signal imitent le son, sans aucune référence aux modalités dont le son émerge, les techniques de modélisation physique vont rechercher et restituer la mécanique de production du son nécessaire au processus de simulation, en construisant ce 'lien avec la source' capable d'orienter efficacement le processus perceptif : à travers la relation entre la mécanique de l'instrument à imiter et les paramètres de contrôle qui dérivent de la modélisation, le modèle se connote comme générateur de son, en assumant une identité instrumentale stable.

Après avoir esquissé ce contexte initial, on a tenté de reconstituer les particularités des techniques les plus significatives de modélisation physique du son, en accordant une attention particulière aux méthodes les plus efficacement employées dans la production musicale. À partir des travaux de Hiller et Ruiz, les premiers à expérimenter cette technique en relation avec la production de sons, les trois principaux schémas de modélisation physique ont été étudiés : respectivement la technique modulaire d'interaction de masse, la technique modale et la technique du guide d'ondes. En raison de leur grande complexité, ces techniques ont été, jusque dans les années 1990, développées dans des centres de recherche spécialisés, ce qui a produit une sorte de géographie de leur utilisation : la technique d'interaction de masse a été

développée au centre ACROE de Grenoble, la synthèse modale à l'IRCAM de Paris, tandis que la technique des guides d'ondes a été développée au CCRMA de l'université de Stanford.

Si, dans cette phase, les pièces musicales ont été composées en étroite synergie avec ces centres de recherche, par la suite, grâce à l'implémentation des techniques dans des environnements d'utilisation plus immédiate, tels que les bibliothèques Max/MSP, PureData et le Synthesis Toolkit (STK) pour les guides d'ondes, nous assistons à une utilisation plus généralisée de celles-ci dans la composition, même si ce même STK, étant lié à une licence d'utilisation du CCRMA et de Yamaha, a souvent été utilisé de manière basique, sans pouvoir développer adéquatement son potentiel performatif. L'aperçu se termine par un examen du langage Functional AUdio STreaming (FAUST), qui est un exemple des dernières possibilités d'utilisation des modèles physiques. Dans un tel langage, il est en effet possible d'implémenter les modèles des différentes techniques de modélisation — guides d'ondes et modales, jusqu'aux premières expériences, ces dernières années, des techniques d'interaction de masse —, preuve supplémentaire de la nécessité de développer un accès plus facile à l'utilisation musicale et, en général, artistique, en vue d'une utilisation fluide des pratiques de synthèse au service de la créativité.

1.2 Du modèle de signal au modèle de source

Si l'on considère l'histoire de la synthèse sonore pour les instruments de musique acoustiques depuis le milieu du XXe siècle, on constate l'utilisation de différents modèles pour formaliser le phénomène acoustique, signe des différentes perspectives qui renvoient à des façons antithétiques de concevoir le son : des premières formalisations abstraites (additives, tables d'ondes, synthèse FM, etc.) centrées intrinsèquement sur les processus perceptifs de l'auditeur et sur les caractéristiques intrinsèques du son (synthèse de signal), aux synthèses par échantillonnage, qui utilisent de vastes bibliothèques de sons préenregistrés, jusqu'à l'utilisation de modèles physiques, qui émulent directement le comportement des instruments, à travers la

modélisation des mêmes mécanismes physiques de production des vibrations (synthèse de source).

La synthèse du signal et la synthèse de la source représentent donc des paradigmes de référence très différents, à l'intérieur desquels les différentes techniques de synthèse du son instrumental se sont développées et, parfois, se sont croisées, dans un parcours qui, partant des premières émulations du son que nous entendons, liées aux phénomènes complexes de la perception, témoigne d'une vision de plus en plus pragmatique, de plus en plus ancrée dans l'objet sonore et dans son contrôle : non pas tant le contrôle du résultat sonore que celui de sa réalisation.

1.2.1 *Le modèle de signal*

La synthèse additive et, plus tard, la synthèse par modulation de fréquence et d'amplitude — les approches classiques de l'analyse et de la synthèse des sons réels et des instruments de musique acoustiques — représentent le début de cette voie.

La synthèse additive, qui est une application des principes de l'analyse harmonique de Fourier, a, depuis ses débuts dans le domaine électronique, exploité ce mécanisme pour imiter le son de n'importe quel instrument de musique, en ajoutant la sortie de plusieurs oscillateurs utilisés comme générateurs de formes d'onde, modulés et ajustés selon les caractéristiques résultant de la décomposition de Fourier. La reproduction de la forme d'onde, qui correspond au timbre de l'instrument spécifique, permet d'émuler sa sonorité. Les compositeurs de la première saison électronique, au début des années 1950, ont créé les premières compositions fondées sur la synthèse additive avec des timbres obtenus en superposant des sons sinusoïdaux à l'aide de plusieurs enregistreurs multipistes.

Composer avec des sons composés est devenu l'axiome qui a unifié la structure formelle et la forme du matériau, constituant l'élément distinctif de la pratique compositionnelle de la musique électronique à Cologne et à Darmstadt, qui s'identifie dans l'union entre la pensée scientifique et la technique sérielle, entre la physique acoustique de Helmholtz et la technique électronique qui permet l'utilisation du son

sinusoïdal. Dans ce sens, un lien idéal est formé entre l'outil analytique — le théorème de Fourier, capable de définir mathématiquement toute forme acoustique — et le critère de construction sérielle, appliqué non seulement aux structures de haut niveau, mais aussi aux éléments vitaux du son. Plus précisément, la construction de mélanges sonores — des agglomérats de sinusoides dans différents rapports séquentiels qui ne se réfèrent pas directement au concept de timbre — répondait, d'une part, au désir de briser l'enchantement des instruments traditionnels par des moyens électroniques, mais témoignait, d'autre part, des difficultés intrinsèques à la réalisation d'une véritable synthèse additive du timbre, qui, après la première euphorie grisante de la saison électronique, ne pouvait évidemment pas soutenir pleinement la comparaison avec la complexité phénoménologique du son.

Si la construction de sons inouïs à travers la somme de sinusoides ne correspondait plus aux attentes perceptives et auditives d'une saison compositionnelle marquée, de toute façon, par l'arbitraire des composants du matériel sonore, à plus forte raison, dans le domaine plus spécifique de la reconstruction du son instrumental, une telle représentation présentait constitutivement diverses difficultés, non seulement à cause du nombre réduit de calculs, mais aussi à cause de l'utilisation d'un modèle qui n'était pas en mesure de décrire le son réel dans toute son intégralité : le timbre n'est pas, en fait, une somme de sinusoides, mais représente une catégorie perceptive complexe que le modèle de représentation emprunté à l'acoustique classique n'a pas permis de satisfaire complètement, comme en témoigne paradoxalement l'évolution rapide des prémisses idéales et procédurales de la saison puriste de la WDR à Cologne.

Le besoin d'une représentation plus précise du son est bien exprimé par Jean-Claude Risset qui, dans les années soixante, pour des besoins essentiellement musicaux, a entrepris ses recherches sur le son dans le domaine numérique. Ses recherches, entamées avec Max Mathews et John Chowning, dans ces années-là, au SAIL (*Stanford Artificial Intelligence Laboratory*), ont donné naissance à une toute nouvelle voie de recherche, fondée sur la perception auditive. Mais même la transition de l'analogique aux langages de synthèse numérique pour la création de spectres complexes, bien qu'elle ait représenté une grande simplification des procédures, n'a pu remédier complètement aux limitations du domaine électronique : même dans le domaine numérique, en effet, la construction était très lente et, en raison de l'énorme quantité

de données qu'elle nécessitait, n'était possible que pour des applications en temps non réel. Mais surtout, le problème dit psychoacoustique — la difficulté de prendre en compte l'énorme complexité des sons musicaux dans un environnement de programmation informatique — déjà décrit par Mathews dans ses recherches sur la synthèse numérique dans les années 1950, allait bientôt être explicitement reconsidéré et reformulé par Risset. En concevant la structure des sons synthétiques en tenant compte des idiosyncrasies spécifiques de l'audition, on peut produire des illusions auditives ou des sons aux propriétés paradoxales, qui révèlent la matière même de notre audition, permettant également de créer des effets musicaux, morphologiques ou théâtraux.

En quelques années, Chowning, grâce à un contrôle minutieux des paramètres et à leur évolution dans le temps, a pu produire une grande variété de timbres aux spectres dynamiques : de la simulation de nombreux instruments de musique à celle de la voix chantée. Il a concentré son attention sur l'aspect perceptif, représenté ici par l'amplitude du spectre, un paramètre saillant pour l'oreille qui dépend de la quantité de modulation, appelée indice de modulation, mais il a surtout souligné son indépendance au niveau du résultat du timbre, qui dérive de relations d'une autre nature. La complexité qui en résulte n'implique pas directement le travail du fabricant de sons, mais laisse la place à des processus non linéaires indépendants du contrôle et à ces aspects du son naturel qui ne sont pas si facilement prévisibles et calculables et qui les distinguent de la plupart des sons synthétisés par d'autres techniques contemporaines.

Ainsi, si d'un côté les recherches de Mathews et Risset avaient conduit à un changement paradigmatique de l'acoustique musicale, qui rendait compte de l'extrême complexité et de l'instabilité morphologique du son, (grâce à l'observation dans les sons orchestraux de la présence de micro-variations de la hauteur et de modulations périodiques, ainsi que de différents temps d'attaque des partiels et de leur différente enveloppe dynamique), avec la modulation non linéaire des signaux, initiée dans le domaine musical par Chowning, elle semble achever le chemin commencé avec l'avènement des synthétiseurs commandés en tension, décisif pour le passage d'une manière de composer centrée sur l'organisation progressive et linéaire d'événements, comme dans la musique concrète, à une pratique compositionnelle dans laquelle ces

événements sont obtenus par un processus qui inclut également la génération du son lui-même.

1.2.2 Le modèle de la source

Dans un contexte comme celui de la synthèse numérique où l'artifice domine puisque les sons ne sont pas produits de manière mécanique et que les causes physiques du son sont complètement éliminées, l'oreille tente néanmoins d'identifier des traces qui peuvent la ramener à une cause physique possible de ce qui est soumis à sa perception. La relation entre la façon dont notre perception reçoit les propriétés du son et la causalité de ces propriétés sera, dans ces années-là, le fondement d'une nouvelle approche de la recherche qui, partant de la prise de conscience de la façon dont, même à son plus haut degré d'abstraction et de formalisation, la pensée ne s'extériorise pas sans un support matériel, arrivera à l'idée d'une "synthèse du son fondée sur la physique".

Étant donné que dans les instruments acoustiques réels, le son émis résulte d'une interaction complexe et mutuelle de paramètres physiques, articulés au sein de structures qui varient dans le temps, l'étude du mécanisme global de production du son a commencé par considérer l'instrument comme composé de sous-systèmes élémentaires : des blocs, dont chacun a sa fonction spécifique. Le système global sera alors approché par le couplage des différents sous-systèmes et leur adaptation d'impédance.

Alors que l'approche spectrale représente une combinaison de fréquences et d'amplitudes résultant d'une interaction entre l'archet et la corde, l'approche de modélisation physique simule la mécanique concrète de cette interaction : une fois que vous aurez créé le modèle d'un objet (par exemple une corde, un tuyau ou une plaque de métal), vous serez en mesure de recréer fidèlement non seulement l'ensemble des sons qui peuvent être produits par l'instrument réel, mais aussi, implicitement, l'ensemble des gestes d'exécution associés à l'émission de ces sons. En particulier, à l'instar de ce qui se passe dans la performance concrète en direct d'un vrai musicien

jouant d'un vrai instrument, le modèle physique permet de préserver les caractéristiques de variété et de cohérence requises par l'oreille humaine. En effet, en décrivant le mouvement d'un objet réel, même s'il est nécessairement simplifié, la modélisation fait en sorte qu'un tel objet évolue sous l'action de forces extérieures, lui permettant de produire ses harmoniques (ou inharmoniques) et tous les accidents qui se produisent en termes de performance, tels que les craquements, les modes de fermeture et les multiphoniques.

Pouvant donner à l'instrument la contingence typique d'une performance réelle, à travers des paramètres étroitement liés aux propriétés physiques de la source sonore, la synthèse par modèles physiques semblait offrir, au moins dans le domaine de l'imitation et dans la production de sons instrumentaux, une certaine correspondance aux attentes de l'oreille. Cependant, comme le but de la synthèse n'était pas tant la reproduction d'un signal désiré que la réalisation d'un générateur jouable, c'est-à-dire caractérisé par une articulation du timbre comparable à celle des instruments classiques, l'attention s'est portée sur les possibilités de contrôle de l'algorithme et de l'articulation du timbre offertes par les instruments synthétiques. L'instrument virtuel peut donc dépasser les limites de l'instrument physique, tout en lui permettant de rester dans le cadre des modalités intuitables dans une représentation mentale physique de l'objet concret, plutôt que produites abstraitement par le signal lui-même. Une approche physique, donc, plutôt qu'imitative : au lieu de regarder le son pour ce qu'il introduit dans le signal, nous regardons le son dans ses mécanismes de production, produisant un signal qui, à bien des égards, nous ramène à la physicalité du monde matériel, à la physicalité des objets qui émettent le son et des moyens par lesquels il se propage.

Le point clé de la modélisation dans le domaine créatif semble donc être la recherche d'algorithmes capables de garantir la plausibilité physique du modèle, en lui conférant une certaine *robustesse* perceptive qui ne limite pas la créativité. La recherche de l'imitation, au sens strict, ne correspond pas, en fait, à une véritable expansion de nos outils créatifs, puisque le processus de métaphorisation d'instruments ou d'objets réels devient plutôt un nouvel espace créatif d'équilibre entre réalité et virtualité. Dans le domaine du traitement numérique du son, ce ne sont plus les contraintes mécaniques qui interviennent, mais les caractéristiques de la perception, qui imposent comme

limites les capacités auditives de discrimination. En impliquant des processus intuitifs, qui récupèrent des catégories de la complexité du phénomène, la modélisation s'enracine dans des processus mécanistes, et explique partiellement le geste, en visant surtout à incorporer des procédures non linéaires dans le modèle. En définitive, le critère est la perception du sujet et, en ce sens, il peut être intéressant d'exploiter toutes les possibilités du son numérique qui ne sont pas disponibles dans le domaine des sons mécaniques.

1.3 Techniques de modélisation physique et implémentations pour la composition musicale

Le premier exemple de synthèse sonore numérique pour les modèles physiques a été créé en 1961 par John L. Kelly et Carol C. Lochbaum, en collaboration avec Max Mathews, aux Bell Telephone Laboratories, dans le cadre de recherches plus larges sur la synthèse vocale. Après cette première expérience, destinée à des fins commerciales, les premières tentatives d'utilisation d'un modèle physique pour la synthèse sonore ont été faites par Lejaren Hiller et Pierre Ruiz, en 1971, qui ont élaboré un modèle de corde numérique en vibration, simulé au moyen de l'archétype masse-ressort, aujourd'hui considéré comme le premier exemple de la "méthode classique". Leurs travaux ont idéalement inauguré une nouvelle ligne de recherche dans le domaine plus général de la modélisation physique, définie plus tard par l'expression *modélisation fondée sur la physique*.

Depuis les études de Hiller et Ruiz, différentes approches de la modélisation physique ont été introduites, permettant de générer des modèles de sources sonores : outre la méthode classique susmentionnée, on peut citer le schéma modulaire masse-interaction, l'approche modale, le schéma du guide d'ondes et l'approche non linéaire *black box*. Ces différences de méthode ont un impact sur la modularité des modèles produits : les modèles d'interaction de masse sont intrinsèquement modulaires, ce qui permet de développer des environnements de modélisation laissant une grande liberté à l'utilisateur, qui peut combiner les différents modules élémentaires pour créer des modèles dont les comportements de haut niveau (propagation des ondes, aspect des

modes de vibration) émergent à partir des propriétés physiques des modules assemblés, alors que d'autres méthodes de modélisation, comme les guides d'ondes et la synthèse modale, sont modulaires dans la mesure où les objets conceptuels qu'elles manipulent ne correspondent pas directement à des objets matériels élémentaires, mais à des phénomènes physiques (ondes ou modes de vibration). Au cours de la dernière décennie, poussé par le besoin d'un accès plus facile et d'une facilité d'utilisation et de modélisation plus immédiate, le langage de programmation FAUST a commencé à être utilisé. Il permet, d'une part, d'incorporer et d'hybrider des techniques de modélisation telles que l'interaction de masse, la synthèse modale et la synthèse de guides d'ondes numériques et, d'autre part, grâce à son caractère modulaire, de créer des modèles complexes pour des applications artistiques à partir de blocs de construction simples. Enfin, les intersections des différents formalismes ont récemment été explorées dans Synth-A-Modeler, un nouvel outil gratuit et open-source de synthèse sonore modulaire pour modèles physiques, qui simule des environnements audio-haptiques virtuels.

Au cours de ce chapitre, les techniques de modélisation les plus importantes pour la construction d'instruments/objets pour la synthèse sonore sont examinées en détail [fig. 1.1], en mettant en évidence les aspects directement liés aux effets sur la créativité et en analysant les tendances et les horizons qui caractérisent l'histoire de la modélisation physique par rapport aux pratiques compositionnelles, un processus — analysé plus spécifiquement du point de vue de la formalisation dans ce chapitre et du point de vue de la production musicale dans le suivant — en évolution continue, ponctué qu'il est par des collaborations fructueuses, des interactions réciproques et des suggestions mutuelles. L'intention est de témoigner combien les spécificités des différents formalismes de modélisation affectent profondément la définition de la nature de l'instrument virtuel et, par conséquent, la caractérisation même de la littérature musicale.

1.4 Conclusions

Au cours de ses cinquante ans d'histoire, l'approche de la *modélisation fondée sur la physique* (PBM), qui est apparue en opposition à la PM traditionnelle — l'apanage,

jusque dans les années 1970, de l'acoustique musicale traditionnelle orientée vers une meilleure compréhension des mécanismes réels des instruments — s'est considérablement développée, s'étendant progressivement aux différents domaines de recherche et aux pratiques créatives de l'informatique musicale.

En particulier, la dernière décennie a mis en évidence la nécessité pour les musiciens de pouvoir accéder à ces modèles par le biais de modes de fonctionnement non spécifiques à la PM, dans un contexte intégré, au sein duquel l'utilisation croisée de différentes méthodes de synthèse de signaux ou de sources peut dialoguer en fonction des besoins créatifs de l'artiste. En ce sens, l'utilisation du langage FAUST est paradigmatique des instances artistiques les plus récentes de l'informatique musicale, marquées par la facilité d'accès, la cross-modalité des processus de synthèse et de contrôle, qui caractérisent la fluidité des pratiques numériques actuelles.

Dans ce contexte, l'élaboration de modèles en temps réel et la recherche d'expressivité pour les instruments numériques a été, dès le départ, l'une des principales préoccupations du PBM, qui s'est enrichie, ces dernières années, du potentiel des interfaces haptiques capables de générer un *feedback* gestuel pertinent pour la performance en temps réel, dans le cadre d'un intérêt croissant pour la dynamique instrumentale multisensorielle de la création artistique, dans le contexte plus large de l'interaction homme-machine.

L'intégration des techniques de signal et de modélisation, si répandue aujourd'hui dans les domaines créatifs les plus avancés des environnements numériques, a des racines lointaines et témoigne de la vocation artistique de la synthèse par des modèles physiques, qui, comme l'a bien souligné Bilbao, s'est inscrite naturellement, dès le départ, dans le cadre du traitement numérique du son, constituant une extension naturelle des techniques traditionnelles plus abstraites du signal, à travers, par exemple, le lien direct « between modal synthesis and additive synthesis, as well as that between digital waveguides and wavetable synthesis, via the Karplus–Strong algorithm ».¹

L'objectif initial de la PBM n'est pas tant de reproduire des instruments acoustiques à la perfection, bien que certaines des recherches menées avec cette approche aillent précisément dans ce sens (voir par exemple [Smith 1996]) et ont donné

¹ Bilbao, *Numerical Sound Synthesis: Finite Difference Schemes and Simulation in Musical Acoustics*, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ 2009, p. 8.

lieu à un ensemble de travaux axés sur la simulation d'instruments de musique développés par des acousticiens musicaux. La modélisation exige plutôt un processus de synthèse : idéalement, le modèle émerge d'une construction d'éléments physiquement pertinents, et non d'une reconstruction analytique de l'instrument réel. La notion de modèle joue ici un rôle essentiel, en tant qu'abstraction visant à condenser de manière formelle l'information représentée par un ensemble de paramètres. L'informaticien construit ainsi son propre modèle conceptuel de l'instrument et développe sa pratique inhérente et conséquente de la performance. Les différents formalismes développés dans le domaine de la PBM constituent donc différentes manières de représenter l'instrument et l'ensemble des gestes qui lui sont liés. Plus précisément, alors que les instruments acoustiques sont caractérisés par le mécanisme de production du son, les classes de sons synthétiques sont caractérisées par la structure spécifique de l'algorithme.

Malgré cela, l'imitation joue un rôle essentiel puisque le développement de nouveaux sons repose stratégiquement sur la possibilité de simuler des instruments existants : savoir imiter le réel permet de mieux le subvertir. En effet, si l'imitation au sens strict du terme peut présenter des avantages pratiques importants pour les musiciens, elle ne correspondra jamais à une réelle amélioration de leurs outils de création, quelle que soit la complexité du modèle. Dans ses travaux de recherche, Smith lui-même soutient d'ailleurs qu'il était préférable de modéliser d'abord les instruments traditionnels — constitués de sons profondément communicatifs et facilement reconnaissables — et seulement après une description détaillée de ces derniers, de procéder à leur éventuelle distorsion.

Le long de cet axe de recherche, constitué par les deux pôles opposés de la réalité, d'une part, et de la virtualité, d'autre part, sont placés les principaux formalismes de la PBM, certains plus naturellement consacrés à l'exploration de la dimension imitative (par exemple, les guides d'ondes), d'autres, cependant, comme dans le cas de l'approche de l'interaction de masse, plus enclins à expérimenter la construction de modèles capables de synthétiser des sons qui n'ont pas d'équivalent dans la réalité. Au contraire, la synthèse utilisant des modèles physiques peut être considérée comme un générateur de réalité musicale à part entière, que les sons produits évoquent ou non les sons d'un objet réel.

L'interprétation physique facilite le contrôle paramétrique de l'instrument, fournissant un modèle conceptuel proche de l'expérience du musicien. On pense, dans ce cas, à une typologie d'approche, comme celle du guide d'ondes, qui, partant précisément d'une description de l'instrument réel, offre la possibilité d'étendre et de modifier les paramètres de contrôle du modèle virtuel, en construisant des instruments étendus, comme on le verra dans le chapitre suivant, tels que la flûte virtuelle de 20 pieds de long utilisée par Paul Lansky dans *Things She Carried* (1996), qui, bien qu'inaccessibles dans le monde physique, restent néanmoins liés à ce monde.

Pour un résultat artistique plus fructueux, il est également possible d'expérimenter des structures qui ne sont pas ancrées dans la réalité physique, et dans lesquelles cette dernière n'est prise que comme source d'inspiration pour aider à la conceptualisation, comme, par exemple, l'utilisation de divers modèles modulaires réels pour assembler le modèle d'une structure vibrante complexe complètement nouvelle. Il est ainsi possible, dans l'approche modale, de simuler des instruments qui changent de forme ou de taille lors de la reproduction, produisant naturellement des variations de hauteur ou de timbre : des structures hybrides, ancrées dans la réalité par leurs composants, mais en même temps complètement autres dans leur configuration finale.

En allant encore plus loin, on peut s'engager dans une exploration totalement libre des possibilités de la modélisation physique, en décidant de renoncer complètement à l'imitation des structures vibrantes naturelles pour exploiter les aspects non physiques que tout système de modélisation introduit nécessairement. Le paradigme de l'interaction de masse, par exemple, construit des objets conceptuels abstraits qui correspondent directement à des objets matériels élémentaires réels. Le système Cordis-Anima permet ainsi de construire, à l'aide de connexions non linéaires, des objets sans signification physique évidente. Comme le souligne Borin-De Poli-Sarti, il s'agit de modèles pseudo-physiques qui ne sont pas ancrés dans la réalité physique, mais dont les seules contraintes sont la stabilité et la passivité, éléments essentiels qui garantissent la faisabilité acoustique des sons produits.

À la base de tels processus, comme le prophétise Risset, un retour à la causalité — composante perdue avec l'introduction du numérique (§ 1.2.2) — apparaît stratégique : il permet de produire des sons naturellement signifiants pour nos oreilles, dont les différentes dimensions sont liées de manière cohérente par la physicalité du processus

qui les a générés. Par conséquent, l'objet modélisé est perçu comme un instrument autonome et cohérent en soi. Il découle d'une discrétisation — chaque fois différente selon le formalisme de base utilisé pour la modéliser — fondée sur des comportements de haut niveau non spécifiés par le musicien, mais qui émergent cependant de la structure des modèles et des propriétés des modules assemblés, de sorte que, si les instruments acoustiques sont caractérisés par le mécanisme de production du son, les familles de sons synthétiques sont caractérisées par la structure de l'algorithme lui-même.

Ainsi, les instruments virtuels, comme les instruments acoustiques, sont dotés *ab origine* d'une richesse timbrique cohérente qui leur est propre, ce qui rend le comportement dynamique et la jouabilité des modèles physiques particulièrement intéressants sur le plan expressif. Dans le cadre de cette stabilité globale de la structure, contrairement aux modèles fondés sur le signal, il est difficile de modifier indépendamment les paramètres perceptifs (intensité sonore, timbre, etc.), puisque la modification d'un paramètre par une entrée gestuelle (en temps réel ou différé) produit, cependant, un effet cohérent sur la perception, créant de manière 'organique' des variations dynamiques subtiles et plausibles.

Contrairement aux modèles axés sur le signal, la modélisation physique n'exige donc pas un *mapping* des inputs du geste sur les paramètres — que ce soit dans des simulations en temps réel ou en temps différé — mais permet une représentation intuitive des actions effectuées avec des objets réels et des instruments de musique, comme pincer, frapper, etc. Cela permet l'utilisation de métaphores du geste instrumental, un échange changeant entre la réalité et la virtualité, qui permet au musicien d'agir de manière créative. Ainsi, l'approche par guide d'ondes se constitue comme un formalisme qui incorpore dans sa syntaxe l'interdépendance entre instrument et geste. Dans l'approche modale, la métaphore se décline dans la modularité à gros grains constituée par des fragments d'instruments et de gestes, librement configurables selon les besoins compositionnels, tandis qu'encore plus extrême apparaît son utilisation dans le formalisme de l'interaction de masse, dans lequel la métaphore s'étend non seulement aux objets/instruments, mais aussi aux figures de l' 'interprète' et du 'chef d'orchestre', selon une hiérarchie complètement

fluide : exemplaire à cet égard est la pièce de Cadoz *pico..TERA* (2001), qui sera largement discutée dans le chapitre 2. 3.

Plus précisément, l'utilisation de la métaphore est stratégiquement entrelacée avec la structuration modulaire des environnements de modélisation, agissant à différents degrés et avec des résultats complètement différents dans la gestion par l'artiste des différents systèmes de conception. Si la modularité doit être comprise comme l'action combinée d'un certain nombre de composants, dotés d'une fonction élémentaire bien définie, il en résulte que le rôle de l'artiste, au sein de ces systèmes, n'est pas limité par un ensemble de fonctions déterminées par les concepteurs, mais est plus librement délimité dans la définition d'un ensemble d'éléments discrets et de leur interconnexion.

Mais à l'intérieur de ce paradigme opérationnel, basé sur la modularité structurelle des langages de modélisation, il faut nécessairement composer avec les processus d'imitation ou de métaphorisation ou d'abstraction complète, résultat de la conceptualisation de la réalité constituée par les concepteurs, avec laquelle l'artiste doit entrer en relation. Ainsi, dans la vaste collection d'échantillons de la lutherie virtuelle, imitation et métaphorisation s'entremêlent dans des proportions idéalement inverses dans la représentation mentale de l'objet : là où l'imitation prévaut, on observera une plus grande fixité modulaire de la copie virtuelle correspondante ; en revanche, dans des environnements hautement modulaires comme ceux de l'interaction de masse, le compositeur pourra fonder son travail sur le développement de sa propre intuition, en s'abstrayant de tout processus d'imitation, grâce à une utilisation totalisée de la métaphore. Dans ce cas, dans le domaine purement abstrait de la virtualité, la métaphore est au service d'un système, par opposition à l'imitation du monde physique, qui est un générateur de réalité : une réalité qui se révèle complètement autre tout en restant plausible, puisqu'elle repose sur les contraintes de la physique newtonienne.

Dans le chapitre suivant, nous analyserons en détail le vaste corpus de la lutherie virtuelle, en notant l'émergence de plusieurs niveaux fluides et idéalement interactifs de distanciation par rapport à la réalité physique — imitation, métaphorisation, abstraction —, qui traversent les différents formalismes évoqués ci-dessus, aboutissant à une multiplicité de résultats et de pratiques.

Ainsi, par exemple, dans le cadre de la technique du guide d'ondes, dans laquelle la modularité est résolue dans la description du mécanisme du résonateur de l'instrument réel, dans une logique entièrement imitative, on identifiera des instruments virtuels qui, une fois codifiés et mis en œuvre de manière spécifique, sont fixés de telle sorte qu'ils ne peuvent être modifiés ni partiellement ni complètement. Il en résulte une catégorie particulière d'instruments à la disposition du compositeur qui excellent dans l'expansion du timbre d'un instrument existant et dans la préservation de ses caractéristiques sonores à travers les registres.

En revanche, le potentiel des méthodes plus modulaires — la synthèse modale et le paradigme de l'interaction de masse — réside dans leur capacité à simuler des modules vibratoires librement reconfigurables constitués de structures résonantes telles que des ponts et des tables dans la synthèse modale, et d'unités plus élémentaires dans le système de réseau de masses-reliées par des ressorts. Par conséquent, la synthèse modale facilite la simulation de structures hybrides, dont les identités sonores émergent des propriétés des modules assemblés, tandis que l'approche masse-ressort-amortisseur excelle dans la création des formes vibrantes les plus abstraites — qui permettent la métaphorisation de tous les paramètres musicaux, y compris l'instrumentation, la composition, l'interprétation et la spatialisation — qui facilitent la création de tout système vibrant imaginable, permettant un niveau d'abstraction plus élevé.

Dans le chapitre suivant, nous identifierons, à partir de ces formalismes et instruments, des paradigmes opérationnels profondément différents : un premier volet — centré sur une idée forte de l'instrument, qui ne nécessite pas que le musicien manipule directement la modélisation — se référant principalement à des approches de type guide d'ondes et modal ; un second volet constitué de méthodes fortement modulaires, comme la *physical thinking* orientée masse-interaction, une pensée physique intuitive ancrée dans la même structure algorithmique d'un tel formalisme, qui, n'étant pas spécifiquement dédiée aux structures sonores, permet la construction de modèles physiques à partir de modules de matière caractérisés par des comportements physiques facilement intuitifs — comme les notions d'inertie, d'amortissement, d'interaction physique, etc. — qui traversent notre corps et notre vie quotidienne. En ce sens, comme nous l'avons déjà vu au cours du chapitre (§ 1.3.2.1),

l'environnement Genesis ou le système plus récent *Hélicanthe*, partant de la quantification de la matière physique et du temps, permettent de concevoir et de simuler des objets virtuels que l'on peut voir, sentir et manipuler.

Chapitre II

Instruments virtuels et pratique de l'interprétation : un excursus à travers le répertoire

2.1 Introduction

La modélisation physique des instruments de musique a été un secteur particulièrement fertile de la recherche sur la synthèse sonore depuis le milieu des années 80, bien que, dans ces années-là, le contrôle de modèles virtuels capables de produire des sons réalistes impliquait, contrairement à d'autres techniques de synthèse, une énorme quantité de calculs et la création d'algorithmes et d'équations complexes, ce qui entraînait des difficultés dans l'utilisation performative du modèle. Le défi consistait donc à créer un modèle capable de sonner exactement comme l'instrument, ou le son, qu'il était censé imiter, d'une manière facilement accessible au musicien, lui permettant de le gérer sans entrer dans une programmation avancée.

Si, dans ces années-là, le développement de modèles satisfaisants pouvait être difficile et long, et l'apanage d'un travail d'équipe dans des centres de recherche spécialisés, les implémentations ultérieures ont sensiblement modifié cette approche, permettant un accès plus facile et plus intuitif au modèle, avec la possibilité de gérer à la fois le comportement dynamique intrinsèque au son produit, et une complexité de timbre analogue à son homologue acoustique. Des implémentations comme, par exemple, la synthèse modale dans Modalys et Tassman, les réseaux masse-ressort dans Genesis, et, par la suite, surtout des applications comme le Synthesis ToolKit, et les diverses bibliothèques de modèles dans Max, PD, etc., jusqu'aux implémentations de la dernière décennie, dans des langages de programmation tels que FAUST (§ 1.3.5, 1.3.6), font partie d'un processus à long terme qui a permis au compositeur de devenir le concepteur de son propre *instrumentarium* virtuel, sans avoir besoin d'entrer dans la programmation directe.

Comme spécifié dans Borin *et al.* l'objectif de la synthèse par modèles physiques est, précisément, de créer des modèles pour la génération de sons, auxquels l'utilisateur

peut accéder de manière naturelle et intuitive, tant pendant le processus de composition que pendant l'exécution. En effet, puisque les modèles physiques sont une sorte de générateurs de la réalité musicale, même éloignés de l'interprétation de la réalité, et, de fait, projetés vers la conceptualisation de cette dernière, leur seule contrainte est d'être stables et passifs, propriétés qui, permettant de choisir les variations paramétriques et de prédire les effets sur la sortie, fournissent un modèle conceptuel qui se rapproche de l'expérience du musicien, tout en lui permettant d'expérimenter des structures non ancrées à la réalité physique.

Le modèle se constitue donc dans la dimension instrumentale-performative, qui est nécessaire, comme le souligne Smith, pour qu'il puisse non seulement générer du son, mais surtout de la musique. C'est précisément dans ce sens qu'il se définit comme un constructeur d'instruments de musique, sans autre précision, car les instruments acoustiques virtuels disposent de toute une série de commandes intuitives et expressives, qui font défaut aux algorithmes de synthèse abstraits, destinés uniquement au codage et à la reproduction du son.

Les instruments virtuels ne font donc pas exception à la règle selon laquelle ce n'est que dans les mains du musicien-utilisateur que l'instrument de musique manifeste ses possibilités, son rôle et sa véritable signification. Dans ce sens, une lecture critique du rôle et de la fonction de ces instruments doit être placée dans le contexte de ce qu'on appelle l'*organologie critique*, qui cherche à redéfinir les critères de l'organologie traditionnelle en s'ouvrant à tout type d'objet sonore, dans lequel l'instrument est constitué comme le siège de l'action, une action qui résiste à toute taxonomie rigide qui pourrait dériver de la manière dont il apparaît, et qui est ouverte, au contraire, pour accueillir les fruits d'une interaction agent qui peut configurer des horizons entièrement nouveaux : on peut alors relire l'instrument — du latin *instruere*, qui signifie disposer, mettre en place, configurer — non pas comme ce qui est disposé ou mis en place mais comme ce qui dispose et configure.

L'objectif de ce chapitre, dans sa tentative de cartographier la multiplicité des agencements idéationnels-performatifs, consiste précisément à essayer de comprendre ce que l'instrument virtuel agence et configure. La nature de la synthèse, ainsi que les modes d'exécution qui en découlent, témoignent de l'existence d'un véritable univers de possibilités qui rend vaine toute tentative de constituer des catégories englobantes.

C'est précisément en raison de la complexité du phénomène informatique qu'il est plus fructueux de cartographier — dans le sens d'une dislocation topologique qui rappelle une structure rhizomatique fluide et continuellement reconfigurable — plutôt que de classer ou de tenter de reconfigurer des catégories qui appartiennent plus proprement à d'autres sphères plus traditionnelles.

Puisque chaque instrument virtuel, dans la mesure où il est construit dans la non-neutralité des techniques, a ses propres particularités, qui influencent ses résultats possibles, sa réalisation renvoie à la projectualité implicite de son auteur, dont il porte à la fois les signes et les limites, circonscrivant un microcosme qui constitue comme sa réalisation. Dans un tel contexte, l'examen des différentes solutions idéationnelles-performatives qui se sont succédé historiquement, qui constitue le noyau central de ce chapitre, n'a pas une fonction purement descriptive, mais plutôt, nécessairement explicative de l'interaction fondamentale entre les techniques et l'homme, de la façon dont les techniques constituent, de plus en plus, la sphère de l'humain, à l'intérieur de laquelle, de plus en plus, l'humain finit par s'exprimer.

Bien que le champ et le concept même de l'instrument virtuel soient aussi hétérogènes qu'en constante redéfinition, ce chapitre se concentre sur une topologie explicative — instruments étendus, hybrides et abstraits — qui ont leur propre historicité, et dont l'utilisation est justifiée, d'une part, par la possibilité de refléter la conceptualité sous-jacente qui lie la représentation du modèle à sa réalisation concrète en tant qu'instrument et, d'autre part, par l'interrelation conséquente avec la littérature musicale produite au cours des quarante dernières années, qui fera contrepoids à la discussion sur les instruments virtuels et fera ensuite l'objet, à travers des *études de cas* spécifiques, du chapitre conclusif de ce travail.

Ainsi, pour chacune des trois catégories d'instruments virtuels, nous avons procédé à un survol de la production musicale, en cherchant à mettre en évidence la relation entre les techniques de modélisation, les caractéristiques des modèles et l'impact sur les pratiques d'exécution et de composition. En outre, étant donné que la construction de systèmes de contrôle — comme, par exemple, des claviers, des dispositifs haptiques et non haptiques, des instruments acoustiques ou des signaux audio, etc. — est un élément fondamental pour le fonctionnement des instruments virtuels, le processus de modélisation doit être pris en compte. - En outre, étant donné

que la construction des systèmes de contrôle — tels que les claviers, les dispositifs haptiques et non haptiques, les instruments acoustiques ou les signaux audio, etc. — constitue un élément fondamental pour le fonctionnement des instruments virtuels, la reconstruction des contextes performatifs sera stratégiquement liée à cet aspect, qui est crucial pour la relation interprète-instrument elle-même.

Si dans la troisième partie de cette recherche, nous chercherons, de manière plus spécifique, à mettre en évidence les processus et les langages compositionnels découlant de la spécificité des instruments virtuels, dans ce chapitre, l'intention sera plutôt d'enquêter sur l'identité des instruments, en ne décrivant pas tant leurs spécificités dans le domaine abstrait de la programmation, mais plutôt dans celui concret des pratiques musicales. Afin de reconstituer une image globale des effets performatifs, un aperçu du répertoire des différents types d'instruments virtuels, qui sera reconstitué en détail dans la base de données en annexe de ce chapitre, sera suivi d'une analyse spécifique d'une sélection d'interfaces d'instruments, afin de vérifier en détail leur potentiel performatif.

2.2 Instruments virtuels : de l'imitation, l'extension et l'hybridation du réel à la génération de l'abstrait

Les techniques de modélisation décrites au chapitre I ont démontré la possibilité de créer une gamme large et variée de modèles physiques, allant de l'imitation d'instruments acoustiques à la construction d'objets qui transcendent la dimension de la réalité. La nature particulière de chaque modèle découle de la représentation sélective de la réalité qui sous-tend le processus de formalisation. Ainsi, bien que le processus de modélisation puisse idéalement être utilisé pour tout type de modèle, dans l'application pratique, les particularités de conception qui distinguent les différentes techniques permettent de produire des modèles, et par conséquent, des instruments, complètement différents.

Dans le domaine de l'imitation, plus précisément de la PM, certaines techniques ont facilité la simulation d'oscillateurs auto-entretenus — comme, par exemple, les cordes, les instruments à vent et, en général, les instruments qui ne produisent du son

que pendant l'injection d'énergie — tandis que d'autres techniques, au contraire, ont été plus efficaces pour modéliser des oscillateurs transitoires, comme les percussions ou les cordes pincées, qui continuent à sonner même après avoir été excités. En particulier, comme nous l'avons déjà vu au chapitre I, les guides d'ondes modélisent des instruments tels que les cordes à archet, les instruments à vent et les cuivres ; l'algorithme de Hiller et Ruiz modélise les cordes pincées ou frappées ; l'algorithme MSW modélise les cordes frottées ; l'algorithme KS modélise les cordes pincées ; et PHISEM modélise les instruments à percussion.

Dans le domaine plus spécifique de la PBM — à l'exception de la synthèse modale et de l'approche par interaction de masse, qui sont modulaires — la plupart des techniques de modélisation créent des objets/instruments sonores simulés à partir du monde réel qui, une fois conçus, tout en ne pouvant être modifiés ni en partie ni en totalité, s'avèrent — en particulier ceux qui utilisent la synthèse numérique par guide d'ondes — compacts, efficaces et adaptés à l'extension timbrale d'un instrument existant, tout en conservant ses propres caractéristiques sonores. Les potentialités de la synthèse modale et des systèmes masse-ressort consistent, en revanche, dans leur capacité à concevoir des modules vibrants librement reconfigurables, explorés notamment dans des environnements tels que Modalys et Genesis (§ 1.3.3.1, 1.3.2.1), qui libèrent le musicien des nécessités de la programmation, ce dernier se limitant à spécifier les seuls systèmes physiques constitués d'éléments mécaniques, acoustiques ou électriques interconnectés.

L'approche modale est plus flexible que le paradigme masse-ressort, en raison de la modularité des sous-structures vibrantes, telles que les chevalets et les tables, qui peuvent être ajoutées ou soustraites pour créer des effets de synthèse variant dans le temps, tels que l'expansion ou la réduction de la taille d'un instrument. La méthode permet également des interpolations timbrales d'un instrument à l'autre, en combinant des sous-structures de manière non naturelle. Les unités de base d'un système mécanique masse-ressort, en revanche, permettent un niveau d'abstraction plus élevé dans la conception des instruments, car l'atomisation élémentaire à la base du formalisme permet de créer n'importe quel système vibrant imaginable, en conceptualisant la réalité sonore en termes plus généraux et en permettant la construction d'instruments complètement abstraits. Ainsi, la synthèse modale facilite la

création de structures hybrides, dont les identités sonores découlent des propriétés des modules amalgamés, tandis que l'approche masse-ressort excelle dans la création des formes vibratoires les plus abstraites, émergeant de l'interaction fluide, sans aucune structuration hiérarchique de tous les paramètres musicaux, y compris l'instrumentation, la composition, l'exécution et la spatialisation.

De ce qui précède, il est possible d'identifier différents modes de représentation des objets sonores qui, dans leur ensemble, témoignent d'une déconstruction progressive de l'instrument acoustique, jusqu'à la plus subtile fragmentation de la matière en atomes qui, précisément en vertu de cet écrasement, permet de produire la construction de l'abstrait, pour la génération d'autres réalités : si, en effet, l'imitation suppose la représentation de l'instrument réel dans son intégralité selon une modularité qui décrit, par exemple, dans la technique du guide d'ondes, le mécanisme du résonateur, l'hybridation implique la représentation de l'objet à différents niveaux de décomposition dans lesquels excitateurs et résonateurs peuvent se mélanger librement, tandis que l'abstraction, enfin, suppose un processus de conception qui se constitue dans la représentation de particules élémentaires de matière.

Le processus de désarticulation progressive de l'instrument, décrit ci-dessus, trouve sa confirmation, en termes de résultat sonore, dans la classification en instruments étendus, hybrides et abstraits, proposée en 2007 par Juraj Kojs, Stefania Serafin et Chris Chafe, qui met en évidence la relation entre le résultat timbrique obtenu et la nature de l'objet modélisé, dans une perspective de distanciation progressive de la représentation des instruments existants [tab. 2.1].

Tipologia di strumento	Oggetto modellizzato	Risultato timbrico
1. Esteso	Strumento od oggetto sonoro esistente	Estensione dei parametri dello strumento
2. Ibrido	Due o più strumenti esistenti o eccitatori	Fusione di differenti strumenti e modalità di produzione sonora
3. Astratto	Strumenti od oggetti sonori astratti	Fusione di agenti fisici di produzione sonora

Tab. 2.1 : Classification des instruments virtuels (d'après JURAJ KOJS - STEFANIA SERAFIN - CHRIS CHAFE, Cyberinstruments via Physical Modeling Synthesis : Compositional Applications, p. 62).

Les instruments étendus sont des simulations d'instruments existants ayant la capacité d'étendre les paramètres au-delà des limites de leur constitution physique. La construction d'une corde virtuelle, par exemple, permet d'augmenter sa longueur, son épaisseur ou la transition continue entre différents matériaux, au-delà des limites du monde physique. Les instruments hybrides, quant à eux, consistent en la fusion des propriétés de deux ou plusieurs instruments existants, par exemple la combinaison de la flûte et de la guitare (§ 2.1, 2.2), tandis que les instruments abstraits, bien qu'inspirés par des lois physiques, n'ont aucun équivalent dans le monde physique, par exemple le *triangle* de Cadoz (§ 2.2.1).

En partant de l'observation de Smith selon laquelle la compréhension des modèles naît de l'observation des mécanismes de production de la pratique musicale — dont la complexité constitue, à la fois, un stimulus et un modèle vers lequel tendre, pour procéder, ensuite, à la distorsion créative (§1.3.4) — il est possible d'interpréter les trois typologies décrites ci-dessus comme des niveaux supplémentaires de conceptualisation de la réalité, qui procèdent du premier niveau d'imitation.

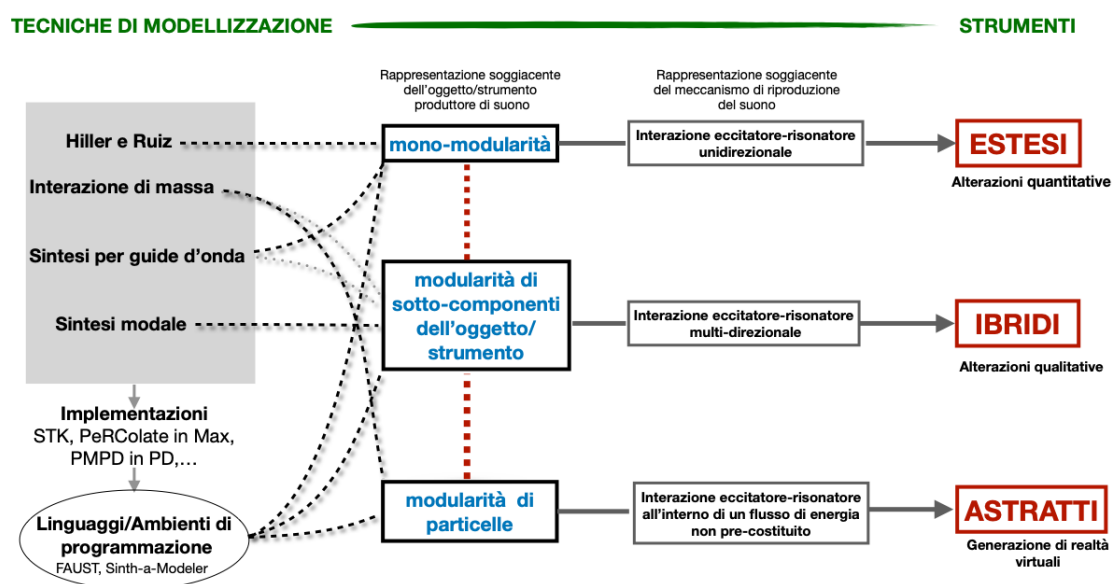


Tableau 2.2 Généralisation de la relation entre la nature du modèle et la nature de l'instrument virtuel

Le tableau 2.2 est le résultat d'un effort de représentation conceptuelle visant à reconstruire un parcours général, qui rend transparent le lien établi entre la conceptualisation qui sous-tend la représentation du modèle et sa transformation en

instrument, dans le cadre d'un processus global de désagrégation de l'identité instrumentale et de sa reconstitution selon d'autres paradigmes : des modèles simulant les mécanismes du monde physique, aux modèles complètement déconstruits dans leurs composants et reconstruits en modules assemblés arbitrairement — mais toujours dans le cadre du paradigme exciteur-résonateur —, jusqu'à l'élaboration de modèles fondés sur l'atomisation de la matière, en fonction d'un retour à une dimension physique élémentaire de transduction d'énergie entre les composants de systèmes abstraits. Dans le contexte du processus de généralisation, reconstitué ici, alors que les instruments étendus, comme nous l'avons déjà observé, sont souvent modélisés par synthèse de guides d'ondes, la synthèse modale s'est avérée plus naturellement efficace dans la simulation d'instruments hybrides — bien qu'il existe de nombreux exemples de projets de ce type avec des guides d'ondes numériques (§ 2.2.1) —, tandis que l'approche de l'interaction de masse, transcendant l'idée de l'instrument traditionnel, dans la perspective d'un objet/phénomène produisant du son, facilite la conception d'instruments abstraits : des instruments tous efficacement utilisés dans le domaine de la composition pour la fondation d'une nouvelle lutherie virtuelle.

Il s'ensuit que, dans le cadre de la discussion générale sur les instruments virtuels, nous avons choisi de traiter ensemble les instruments étendus et hybrides (§ 2.2.1) puisqu'ils partagent, bien que de manière différente, un ancrage commun au monde physique, réservant, en revanche, un paragraphe spécial pour l'étude des instruments abstraits, étant donné leur nature complètement différente par rapport à la physicalité du monde réel (§ 2.2.2).

2.2.1 Processus de transformation réels : instruments virtuels étendus et hybrides

Dans le domaine virtuel, le système réel de production du son est représenté par les mécanismes d'interaction entre l'excitateur (par exemple, l'archet, le doigt ou le souffle) et le résonateur (par exemple, les cordes couplées aux chevalets et aux caisses de résonance). Il s'ensuit que les répliques étendues de ces mécanismes découlent, premièrement, d'une compréhension des processus observés dans le monde physique (par exemple, pincer une corde, faire sonner une cloche, etc.), et, ensuite, par leur

amplification et leur augmentation ultérieures, grâce auxquelles les dimensions et les propriétés des matériaux peuvent dépasser quantitativement les limites du monde physique lui-même, bien que la relation habituelle à sens unique entre exciteur et résonateur reste intacte : pincer un modèle de corde aussi long que les câbles porteurs du *Golden Gate Bridge* est un exemple d'instrument virtuel étendu, tout comme, de la même manière, un exemple d'instrument virtuel étendu est celui utilisé dans *Corda di metallo* de Michelangelo Lupone (1997). Dans cette pièce, l'algorithme de Hiller et Ruiz, retravaillé par Marco Palumbi et Lorenzo Seno, a été utilisé pour modéliser un instrument à cordes — un des premiers exemples d'application de cette méthode, dans le domaine artistique, pour modifier les paramètres de construction de la corde — afin de créer des articulations gestuelles nouvelles et inhabituelles (§ 2.2.1.1, 3.5.1).

L'algorithme de McIntyre, Schumacher et Woodhouse, axé sur l'examen détaillé du comportement des sons dans le domaine temporel, bien que coûteux en calculs, est particulièrement efficace pour une simulation précise de l'interaction entre la corde et l'archet, car il tient compte de la taille de l'archet lui-même : deux points situés sur les côtés extérieurs de l'archet définissent, en fait, les limites de sa longueur. Cet algorithme a notamment été implémenté par Chafe dans le Celletto (§ 2.2.1.2), une interface qui lui permettait d'étendre les propriétés de timbre de l'instrument physique.

L'algorithme de Karplus-Strong et sa version étendue se sont révélés être l'une des techniques les plus efficaces pour la simulation de cordes pincées et de percussions dans les applications en temps réel, comme en témoigne l'utilisation de cette technique par Jaffe, qui l'a utilisée pour étendre les possibilités timbrales des cordes pincées — sans compromettre leur identité sonore — dans les compositions suivantes : *May All Your Children Be Acrobats* (1981), *Silicon Valley Breakdown* (1982), *Telegram to the President* (1984), *Grass* (1987) et *Racing Against Time* (2001), ainsi que dans d'autres œuvres.

La synthèse de guides d'ondes est la technique la plus utilisée pour le traitement des instruments étendus, car en simulant des modèles fixes, les paramètres de contrôle peuvent facilement être utilisés pour étendre les capacités des objets modélisés. En général, les systèmes à spectres quasi-harmoniques se prêtent à une modélisation par des guides d'ondes unidimensionnels, tandis que les systèmes à spectres inharmoniques sont modélisés plus efficacement par des réseaux de guides d'ondes à deux et trois dimensions (§1.3.4). Les guides d'ondes unidimensionnels ont été utilisés pour

modéliser différents types d'instruments comme, par exemple, le tractus vocal, les instruments à cordes et à vent, le piano et les tubes sonores ondulés. Les objets comportant un nombre limité de composantes inharmoniques, tels que les barres de percussion, la scie musicale, le bol tibétain et l'harmonica de verres, sont modélisés à l'aide de guides d'ondes par bandes.

Chris Chafe, en collaboration avec Greg Niemeyer, a conçu en 2001 *Oxygen Flute*, un environnement musical interactif en temps réel sur ordinateur, qui modélise, par des techniques de guide d'ondes, quatre flûtes chinoises en bambou vieilles de 9000 ans provenant des sites archéologiques de Jiahu (§ 2.2.1.5). La même année, avec Greg Niemeyer, des cordes virtuelles ont été modélisées dans *Ping*, qui se dilatent et se contractent de manière paramétrique suite à la transmission de données temporelles sur Internet.

Matthew Burtner utilise des modèles de guides d'ondes, conçus par Stefania Serafin, comme, par exemple, dans *S-Morphe-S*, où le signal du saxophone est utilisé comme impulsion d'une cloche tibétaine physiquement modélisée, avec pour résultat d'obtenir un instrument qui possède les particularités articulatoires d'un saxophone soprano, comme, par exemple, le clic des touches, la respiration, les trilles et les sons soutenus, avec le corps résonnant d'une cloche tibétaine dont la forme et les propriétés matérielles changent en temps réel, créant un corps en métamorphose continue. Le titre évoque, en effet, la transformation désincarnée à laquelle le mot grec fait allusion, rappelant explicitement l'image de corps et de formes désincarnés en transformation continue.

That Which is Bodiless is Reflected in Bodies, pour cloche tibétaine et son généré par ordinateur à 8 canaux, a été composé pour la *Rotunda Dome Room* de l'Université de Virginie, imaginé comme une cloche tibétaine géante inversée. La pièce, qui commence et se termine par un percussionniste jouant d'une véritable cloche tibétaine, explore le phénomène des battements caractéristiques de l'instrument, qui, dans le modèle virtuel, s'étend à une multitude de variations spectrales et de rythmes. Ce dernier, qui résonne des haut-parleurs, avec le public placé au milieu de la salle, change continuellement de forme et de dimension avec la pulsation, créant une 'réincarnation dansante' toujours nouvelle de l'espace virtuel, et expérimentant, de cette façon, la

distorsion, l'impulsion polymétrique et sa propre transformation structurelle (§ 2.1.8, 3.3).

Juraj Kojš a composé une vaste série d'œuvres avec des modèles de guides d'ondes, comme *Garden of the Dragon* (2003), *Three Movements* (2004), *Air* (2006), *Concealed* (2006), *En una noche oscura* (2006), *In Secret* (2006) et *To Where He Waited* (2006). Il s'agit, comme l'admet le compositeur lui-même, de musiques fondées sur l'action, dans lesquelles c'est l'action mécanique qui motive la création de tous les aspects de la composition, y compris sa conception, sa forme, son instrumentation, sa conception instrumentale, son exécution et la partition elle-même. La synthèse par modèles physiques est appelée à structurer l'imitation et l'extension de sources sonores existantes, transposant cette musique fondée sur l'action dans le monde virtuel. Kojš utilise à la fois des instruments de musique et des objets du quotidien, ainsi que des jouets musicaux tels que, par exemple, des tubes sonores, des cordes à archet, des fujara, des cloches tibétaines, *bowed bar*, des flûtes *2D mesh* (§ 3.5.2).

Une autre catégorie d'instruments étendus est représentée par les instruments à percussion impliquant le mouvement et la collision de particules, modélisés à l'aide de la technique PhISEM de Cook. En appliquant les principes stochastiques de la collision des particules, on a modélisé à la fois des instruments shaker comme le maraca, le sekere et la cabasa, et des instruments concussifs avec un grand nombre de particules et de fréquences de résonance comme le tambourin et les cloches de traîneau. L'extension des limites du mode physique est rendue possible ici en contrôlant plusieurs paramètres du modèle significatifs sur le plan psychoacoustique, tels que le nombre d'objets en collision, les propriétés d'amortissement ou la fréquence de résonance.

Alors que les nombreux cas pratiques abordés dans ce chapitre témoignent du grand potentiel de manipulation des instruments virtuels étendus, une distorsion plus radicale et un éloignement des catégories du réel sont mis en œuvre par les instruments hybrides, caractérisés par la fusion de plusieurs instruments, ou de parties de ceux-ci, au sein d'une structure unique dont la dominance timbrale émerge des différents alignements paramétriques de ses composants. Il s'ensuit que, si les techniques de modélisation des instruments étendus permettent la reproduction et l'expansion paramétrique des mécanismes de production du son — en proposant, toutefois, des

interactions unidirectionnelles entre l'interprète et son instrument conformes au monde physique —, dans la réalité hybride, le paradigme excitateur-résonateur, interprétable par des blocs modulaires connectés en réseaux sériels et parallèles, peut être analysé et reconfiguré en inversant les fonctions de ses composants, et ainsi réinterpréter la création musicale au-delà de la sphère du monde physique.

Ainsi, bien que le paradigme excitateur-résonateur soit maintenu, il est possible d'introduire dans un système hybride un couplage qui n'est pas couplé dans le monde physique — comme cela se produit, par exemple, en pinçant la membrane d'un tambour — ou, encore, de multiples excitateurs et résonateurs peuvent être organisés pour former des réseaux d'interactions et d'instruments hybrides avec un flux d'énergie multidirectionnel. Si, par conséquent, jouer d'instruments étendus implique qu'ils soient physiquement excités, permettant ainsi la mise en œuvre d'explorations timbrales et matérielles par le biais d'altérations quantitatives, la nature de la réalité hybride réside plutôt dans des altérations qualitatives, dans le flux et le type d'énergie, résultant de relations réciproques entre l'interprète et l'instrument, et dans l'exploration de *feedback* multimodaux dans les espaces de simulation, qui contribuent à la création d'une nouvelle acoustique avec des timbres existant exclusivement dans l'espace virtuel : si, en fait, pincer la corde avec le plectre est une interaction congruente avec le monde physique, pincer le plectre est un exemple de modalité hybride, dans une réalité qui n'est pas seulement simulée et étendue, mais entièrement manipulée et réinventée.

Restant, au contraire, dans des systèmes totalement virtuels, les interactions typiques de la nature hybride ont été contrôlées directement dans des environnements informatiques tels que Modalys, Tassman, Genesis, Max/Msp, Pure Data jusqu'aux implémentations les plus récentes dans des environnements plus conviviaux et immédiats. Si les exemples de simulation d'instruments hybrides avec guides d'ondes numériques et réseaux masse-ressort ne manquent donc pas, la synthèse modale est cependant celle qui est spécifiquement conçue pour ce type de simulation, tant au niveau des contrôles qu'au niveau de la construction des nouvelles structures instrumentales elles-mêmes. En particulier, la modularité, principale caractéristique de la synthèse modale, permet d'utiliser des sous-composants en interaction, mais autonomes, pour la construction du modèle. De plus, grâce à l'homogénéité de représentation de toutes les structures vibrantes du modèle, il est possible d'ajouter ou

de soustraire de telles sous-structures afin de créer des effets de synthèse variant dans le temps, comme l'expansion ou le rétrécissement de la taille d'un instrument, afin de simuler son changement pendant l'exécution (§ 1.3.3.1).

En 1999, Hans Tutschku, dans *Eikasia*, pour bande à 8 pistes, a été parmi les premiers à utiliser des instruments virtuels hybrides, créés par synthèse modale, notamment à l'aide du logiciel Modalys. Dans le but d'atteindre une complexité sonore équivalente à l'utilisation d'autres techniques de synthèse plus établies, le compositeur fusionne dynamiquement différentes plaques, circulaires et rectangulaires, aux caractéristiques spectrales distinctes et les excite en fonction des données d'analyse des cordes graves du piano (§ 3.4). La combinaison paramétrique et l'oscillation entre les différents modèles parents ont conduit à la création de plaques virtuelles hybrides.

En conclusion, il convient de souligner la plus grande pertinence quantitative des instruments étendus par rapport aux instruments hybrides, en raison de leur facilité d'utilisation, ainsi que de la compacité des modèles, sans oublier leur plus grande proximité avec l'objet réel simulé. Cela se reflète, de manière spéculaire, dans le nombre de cas traités dans les études suivantes, dans lesquelles le rapport entre la nature du modèle, le potentiel performatif et la contextualisation dans la sphère compositionnelle a été analysé pour chaque instrument, données qui ont été schématisées dans le tableau récapitulatif [tab. 2.3].

2.3 Conclusions

Grâce à la large reconnaissance effectuée dans ce chapitre, une tentative a été faite d'analyser le potentiel performatif des techniques de modélisation physique du son. Le critère de choix qui a accompagné cette analyse a privilégié la documentation de l'extrême variété et hétérogénéité des solutions expérimentées au fil des ans. Cette multiplicité constitue une valeur qui témoigne de la fécondité des techniques de modélisation physique et de ses possibilités expansives dans des contextes très différents, qu'il a été possible d'apprécier et de valoriser précisément à travers la reconstruction d'un panorama aussi complet que possible.

Comme on l'a noté au cours du chapitre, la construction de l'instrument reflète, de manière non arbitraire, la conceptualité instrumentale qui sous-tend la formalisation du modèle : si les implémentations de la STK semblent constituer l'accès le plus utilisé aux techniques de modélisation, on observe comment, dans la plupart des cas, — du moins dans le contexte des instruments discutés ici — ces dernières ont été explorées non pas tant dans le but de créer de nouvelles identités instrumentales, mais plutôt dans celui de manipuler des identités connues sous la bannière de l'extension paramétrique du modèle initial, c'est le cas, par exemple, de l'algorithme des *Corda di metallo* à travers lequel Lupone recherche une nouvelle matérialité et une nouvelle articulation technique du système cordes-arc en dialogue avec le langage de la tradition, ou du modèle élaboré par Jaffe qui provoque l'expansion paradoxale des cordes pincées d'une mandoline dans les câbles du *Golden Bridge*.

S'il est évident que — puisque la modélisation de ces instruments, par sa nature même, se concentre sur le contrôle des mécanismes de production du son — la manipulation paramétrique concerne inextricablement l'instrument et le geste, ce dernier peut aussi se constituer, dans l'acte d'exécution, soit comme une reproduction, soit comme une expansion, soit comme une hybridation et une abstraction de gestes réels.

Un exemple particulier et significatif, parmi les nombreux examinés, est l'expansion des paramètres du mécanisme de production du son du modèle de quatre flûtes chinoises en bambou, le point d'appui sur lequel est construite l'installation de *Oxygen Flute* de Chafe, créant ainsi un espace artificiel interactif qui s'étend et se rétracte au gré de la respiration humaine qui excite le modèle. En outre, l'accent mis sur les mécanismes de production du son a donné l'impulsion à l'exploration des objets quotidiens, ce qui a permis d'étudier en détail le potentiel de la modélisation du geste, non pas dans le sens des gestes instrumentaux traditionnels, mais dans le sens anthropologique de l'action, cette action qui constitue, comme on le verra dans le troisième chapitre, le pivot de la *cyber action composition* de Kojs (§ 3.5.2).

L'expérimentation artistique de l'extension quantitative des paramètres de modélisation des objets et des mécanismes de production a, dans d'autres expériences, dépassé les limites de l'identité instrumentale du réel, au point d'explorer de nouvelles identités et de nouveaux gestes qui ne correspondent plus à la relation typique

excitateur-résonateur. Le résultat le plus distancié est constitué par l'hybridation d'instruments et de gestes, tous dans le virtuel, expérimentée par Kojs qui, dans *E-clipping* (2008), pour sortir de l'artificialité de la tradition, prend pour modèle la complexité de la nature. Dans la pièce, comme on le voit dans les différents instruments créés par l'auteur – *Buiara*, *Psychopsis* et *Odontocidium* – la virtualité permet des explorations gestuelles qui s'écartent des mécanismes habituels de production du son, créant un mélange de composants et d'actions qui échappent complètement à l'expérience.

Au contraire, dans une sphère performative complètement abstraite, il existe des instruments générés à partir d'unités physiques élémentaires qui, bien qu'enracinés dans la mécanique du monde physique, sont réalisés dans le monde virtuel par une structuration complètement fluide des éléments : l'orchestre de *pico..TERA* en est un exemple, dont les instruments sont générés par différentes articulations temporelles : des micro-événements simpleés (*à vent*, *maracas* et *triangle*) aux macro-événements temporels complexes (*batteur*, *serpent* et *domino*), jusqu'à un niveau de complexité supplémentaire, jusqu'à un autre niveau hiérarchique, constitué par le *leader*, qui coordonne les gestes au sein de l'orchestre : des instruments aliénants, donc, qui se nourrissent métaphoriquement du réel, comme nous en témoignerons dans le troisième chapitre (§ 3.4).

Les instruments abstraits ont été bien étudiés dans *Hélios* et, plus encore, dans *Quetzalcóatl*, qui témoignent de l'intérêt de plus en plus stratégique pour le potentiel multimodal, jusqu'à l'intégration d'interfaces à double système haptique, pour la gestion d'instruments physiques virtuels immersifs en 3D.

La conceptualité sous-jacente à cette multiplicité proliférante d'effets performatifs est constituée par la nature même de la modélisation physique qui s'enracine dans le modèle de la source, qui détermine un espace d'invention potentiellement infini, dans lequel le musicien construit son instrument, qui devient un élément essentiel de l'acte créateur. La frontière entre réel et virtuel apparaît ainsi comme le cœur de cette synthèse qui, enracinée dans la physicalité, se projette dans le virtuel, produisant des agencements performatifs qui réécrivent de manière toujours différente la relation entre virtualité et réalité. Ainsi, les instruments et les gestes se constituent dans la référence incontournable à la relation fondamentale entre réalité et virtualité, témoignant de similitudes, de variations ou d'éloignements : éléments du réel

qui sont déformés, quantitativement ou qualitativement, dans le virtuel, tout en restant dans des modes performatifs congruents avec le monde physique, ou éléments entièrement conçus dans le virtuel qui retournent au réel par un processus de métaphorisation (§ 3.4).

Avec le développement d'environnements compositionnels de plus en plus interactifs, qui caractérise la recherche de ces dernières années, on assiste à une nouvelle expansion du contexte performatif des instruments virtuels : la simulation multisensorielle en temps réel, la synchronisation de l'architecture software/hardware en temps réel, la création de nouveaux objets sonores sur de nouvelles fonctions CAO sont des domaines interdépendants qui constituent les nouvelles frontières de la recherche artistique dans ses déclinaisons transdisciplinaires et immersives, à travers lesquelles les instruments virtuels sont soumis à une redéfinition continue.

Ces expériences multiples représentent de nouvelles expériences dans des formes d'art multisensorielles centrées sur la dynamique physique entre plusieurs acteurs et des connexions physiques simulées. La tendance, dans les œuvres récentes, à exposer des expériences physiques partagées par le biais de l'interaction *force-feedback* (§ 2.2.2.3) — comme l'inter-instrumentalité vécue par Cadoz dans *Quetzalcóatl* — est particulièrement fructueuse pour le développement de la recherche reliant l'expérience tactile aux émotions humaines et à la communication interpersonnelle. L'haptique constitue, dans ce contexte, un outil unique pour explorer ce domaine, analyser les processus cognitifs incarnés, quantifier l'impact des échanges d'énergie entre le corps et les instruments et, plus généralement, produire des défis scientifiques et artistiques entremêlés.

L'utilisation de ces pratiques, également dans la conception d'instruments de musique, peut représenter l'émergence d'une nouvelle branche d'instruments de musique numériques fondés sur l'intentionnalité et l'impédance motrice plutôt que sur le contrôle au sens strict, développant ainsi leur potentiel physico-dynamique. Ainsi, non seulement nous nous appuyons sur le *feedback* auditif pour naviguer entre les sons, mais nous sommes également guidés par des échanges tangibles continus avec l'instrumentarium, qui permettent de concrétiser l'idée d'un son numérique efficacement modélisé et articulé par le biais d'interactions tactiles tridimensionnelles (3D). Cela donne lieu à de nouvelles possibilités de conception d'interactions fondées

sur une myriade de gestes, dans lesquelles on peut rencontrer des surfaces virtuelles et se déplacer dans différentes atmosphères à différentes vitesses.

La perspective est de créer un environnement intelligent pour la gestion des problèmes software et hardware liés au suivi, au *mapping* paramétrique et à l'interface avec les instruments virtuels. En ce sens, de grands efforts ont été déployés dans la recherche et la mise en œuvre d'interfaces de plus en plus complexes en réponse, d'une part, à une demande d'expressivité et de continuité toujours plus grandes et, d'autre part, à la possibilité d'utiliser de multiples paramètres comme un flux continu de données de contrôle, à différents degrés de modulabilité.

Dans le domaine plus strictement compositionnel, les nouveaux instruments hybrides — combinant des éléments physiques/acoustiques et virtuels/numériques physiquement informés — sont physiquement cohérents par nature et permettent aux concepteurs d'instruments de jouer avec les points forts des éléments acoustiques et numériques. Les technologies actuelles nous permettent d'estomper les frontières entre le monde physique et le monde virtuel, ce qui permet aux concepteurs de traiter les pièces d'instruments de manière multidimensionnelle. Le FAUST Physical Modeling Toolkit (§ 1.3.6), par exemple, facilite la conception de tels instruments, en offrant un moyen d'aborder la modélisation physique à un très haut niveau : les appareils mobiles, combinés à des extensions physiques passives ou actives, dans ce contexte, peuvent devenir le cœur de la mise en œuvre de nouveaux instruments hybrides : les smartphones et les tablettes peuvent être augmentés d'éléments passifs et actifs qui participent à la production de sons (par exemple, des résonateurs, des excitateurs, etc.), ce qui ajoute de nouvelles fonctionnalités à l'appareil ou modifie son esthétique et/ou sa forme générale (§ 1.3.6). Ces nouveaux instruments sont liés à de nouveaux logiciels qui ont permis, ces dernières années, le développement d'un nouveau type de lutherie virtuelle, obtenue en modélisant de nouveaux résonateurs à partir d'un dessin CAO en 3D. Les avantages de cette approche sont la production de sons hyperréalistes de haute précision, la possibilité de concevoir des sons à partir de modèles 3D et la simulation physique d'instruments impossibles fabriqués à partir de matériaux rares et exotiques.

Chapitre III

Composer avec des instruments virtuels : de la virtualisation du geste et de l'instrument à la pensée physique

3.1 Introduction

Depuis les années 60, dans le domaine de la musique générée par ordinateur, après une première saison dominée par la logique rigoureuse des machines à composer — c'est-à-dire par ces divers formalismes musicaux à base logico-mathématique, proposés à plusieurs reprises au cours du siècle — grâce aussi au développement de programmes plus indépendants du substrat hardware et, surtout, à la possibilité d'un plus grand accès aux codes de programmation, on assiste à une plus grande autonomie d'action dans l'expérience des pratiques musicales. La figure réapparaît alors d'une relation dialectique et contradictoire au sein du processus technico-musical, scène d'une confrontation qui n'a rien d'évident et de linéaire, sanctionnant la conflictualité entre l'horizon des moyens et l'horizon des fins, qui émerge chaque fois que la force de la pensée musicale exige un travail technologique sérieux et une recherche des fins et des moyens : chaque œuvre s'offre comme la trace sensible d'un ensemble de choix et d'options qui établit une relation particulière entre la fabrication de l'art et les conditions techniques d'existence qui lui sont liées, et renvoie à certaines formes de travail, à diverses connaissances techniques et à diverses manières de comprendre la fabrication de l'art.

En reprenant le schéma sémiotique tripartite de Jean Molino — neutre/immanent, poïétique et esthésique — que Jean-Jacques Nattiez applique également à la musique acousmatique, nous devrions placer toutes les procédures qui l'ont générée dans l'acte de composition, et donc aussi les autres composants matériels tels que les instruments, la notation, l'espace. Ainsi, face à un art qui n'est plus enfermé dans la seule dimension esthétique, mais également inclus dans le domaine de la connaissance technologique, comme en témoigne un processus de rationalisation des

pratiques et des matériaux, nous pourrions identifier, en ce qui concerne l'informatique, une voie de progression de plus en plus envahissante dans le champ poïétique de l'art, et donc dans les domaines de l'interaction culturelle et cognitive : une action artistique visant de plus en plus à composer du son et une action technologique visant de plus en plus à composer avec des sons.

Dans une relation aussi complexe, traversée par des parcours nécessairement interdépendants des deux dimensions, nous pourrions placer les deux paradigmes de la représentation du son dans le domaine numérique qui ont été illustrés dans le premier chapitre : les modèles de signal, qui tentent de reproduire le son sans se référer au mécanisme physique qui le génère (reproduction de l'effet), et les modèles de source, qui génèrent le signal acoustique en simulant le mécanisme physique de sa production : pour ces derniers, ce n'est pas l'analyse du signal que nous percevons qui est pertinente, mais l'analyse de la manière dont le son est produit (reproduction du processus).

En comparant les deux paradigmes, on pourrait identifier, sur une longue période, une virtualisation progressive des éléments fondamentaux des pratiques performatives-compositrices : des premiers exemples de synthèse de signaux, à la synthèse de sources sonores (instruments et gestes) jusqu'aux pratiques de composition les plus actuelles dérivées de l'intelligence artificielle (par exemple, *machine learning* appliqué aux processus de composition). Si les processus compositionnels de la première saison de musique assistée par ordinateur étaient en fait tous inclus dans le monde de l'instrumentalité, en tant que moyens au service d'une idée compositionnelle préconstituée, un chemin d'osmose entre la dimension idéationnelle et celle de l'instrumentalité s'est structuré, qui a sanctionné l'entrée du virtuel dans la créativité artistique.

La synthèse à travers des modèles physiques est, en ce sens, une étape fondamentale, permettant, entre autres, le renversement de perspective de l'action compositionnelle : elle ne s'adresse plus au son, mais à l'action mécanique qui le produit, en tant qu'instrument et geste. L'espace compositionnel offert par la modélisation se configure donc à travers un processus de fondu enchaîné entre le processus de virtualisation de la pratique musicale et la désintégration de l'instrument provoquée par les différentes techniques de modélisation : de la modélisation de l'instrument et du geste, au démembrement et à la recomposition en de nouvelles identités de

l'instrument, pour arriver à l'atomisation de la matière, afin de réinventer tout le cycle créatif, comme dans Genesis, qui se présente comme un moyen unique de créer de la musique.

Au cours du chapitre, cette dialectique au sein du virtuel entre l'instrument/la gestuelle et le processus de composition sera éclairée, soulignant la mesure dans laquelle l'instrumentalité entre dans la sphère de l'idéation et de l'articulation linguistique avec des perspectives et des résultats toujours différents, produisant des espaces perceptifs sans précédent entre le physique, le plausible et le totalement abstrait. À cette fin, trois études de cas seront proposées – *Corda di Metallo* de Michelangelo Lupone, l'un des premiers exemples d'utilisation artistique de la modélisation d'une corde dérivée de la méthode de Hiller-Ruiz, la *cyber action composition* de Juraj Kojš et, enfin, les œuvres de Mauro Lanza qui utilisent des modèles physiques — qui témoignent de trois perspectives complètement différentes sur l'utilisation des techniques de modélisation physique.

3.2 Composer dans le domaine du vraisemblable

Les instruments construits à l'aide des techniques de modélisation, décrites au chapitre II, nous ont montré une gamme large et très variée de la lutherie numérique qui, partant de l'imitation complète de l'instrument physique, va jusqu'à construire des modèles qui transcendent complètement la dimension de la réalité : des instruments virtuels qui simulent les mécanismes du monde physique, à travers des structures capturées du monde physique lui-même, des instruments complètement déconstruits dans leurs composants et reconstruits en modules assemblés arbitrairement, jusqu'à concevoir des mécanismes de production sonore complètement nouveaux qui transcendent la réalité, fondés sur l'atomisation de la matière, dans lesquels la dimension culturelle de l'objet/instrument se perd, en fonction d'un retour à une dimension physique, élémentaire. Ces différentes dimensions de la représentation des objets sonores témoignent, dans leur ensemble, d'une déconstruction progressive de l'instrument acoustique, jusqu'à la plus subtile fragmentation de la matière en atomes qui, précisément à travers cet broyage, produit une construction progressive de l'abstrait

pour la création d'autres réalités : comme l'affirment, en effet, Borin *et al.* les modèles physiques sont des générateurs de réalité.

L'interaction entre abstraction et réalisme représente un fondement indissociable de la littérature de modélisation physique analysée, constituant les extrêmes de référence d'un espace virtuel, au sein duquel s'articule l'action compositionnelle de l'artiste (§ 2.4). Cependant, le réalisme auquel il est fait référence, à travers la simulation de la modélisation, est, par nature, déjà autre que le réel — le modèle, en effet, simule le réel en sélectionnant certains traits afin de construire un mécanisme d'action fonctionnel à la construction d'un son organique et complexe, et à partir de cet artifice commence une extension dans le virtuel — tout comme, paradoxalement, l'abstrait se construit, au contraire, à travers la modélisation d'éléments physiques, non pas de paramètres directement acoustiques, mais matériels, comme nous l'avons vu dans les recherches de l'équipe ACROE. Bien que la référence à la réalité puisse être distante, le son, bien qu'il puisse être aliénant et abstrait par rapport à la réalité physique culturellement reconnaissable, constitue cependant le résultat d'un mécanisme générateur enraciné dans le monde physique et dans la matière, générant un espace dans lequel l'oreille peut s'orienter : le physiquement plausible.

Le lien complexe entre réalisme et abstraction passe donc par la question de la identification d'une source sonore dans le processus perceptif, une question abordée dès les débuts de l'informatique musicale, dans les écrits de Risset, qui soulignait que plus les sons synthétisés avaient un meilleur profil et étaient plus facilement acceptés par les auditeurs, plus le sujet était amené à croire qu'ils avaient été produits selon une certaine modalité physique, ce qui implique que la perception d'un certain niveau de physicalité contribue de manière décisive au niveau de crédibilité attribuable au son synthétisé (§ 1.2.1). S'il est vrai, par conséquent, que toute technique de synthèse peut produire des sons si précis qu'il est possible de reconstruire l'appel hypothétique à un mécanisme physique supposé de production, cependant, pour les raisons indiquées ci-dessus, les modèles physiques produisent des sons naturellement crédibles, même s'ils ne sont pas conçus en référence à un objet réel : les entrées dans un modèle physique, en effet, tendent à modifier de façon cohérente les différents paramètres perceptifs, créant des évolutions dynamiques plausibles des sons et renforçant fortement, de cette façon, l'illusion d'une cause permanente.

Cependant, une telle source ne doit pas nécessairement correspondre à un équivalent dans le monde réel, même si elle est capable de posséder un certain caractère physiquement plausible. Le concept de plausibilité est donc lié aux notions d'incertitude/ambiguïté, car ce qui est plausible est constitutivement incertain. La question de l'incertitude peut être développée selon deux axes qui interagissent étroitement dans le concept de plausibilité physique : d'une part, l'incertitude est de type aléatoire-stochastique, c'est-à-dire liée à l'ambiguïté de la source, d'autre part, elle est de type épistémique, c'est-à-dire liée à l'incertitude du sujet percipient. Ainsi, dans le domaine complexe de la plausibilité, la source et le sujet percipient sont constitutivement liés, même si la dynamique de cette interrelation se situe dans l'horizon de l'incertain et de l'ambiguïté.

C'est probablement à partir de ces hypothèses que Smalley a introduit le concept de *liaison à une source* (*source bonding*) afin de représenter la connexion entre l'intrinsèque et l'extrinsèque, en d'autres termes, le lien signifiant qui lie le monde sonore interne au monde sonore externe : «the *natural* tendency to relate sounds to supposed sources and causes, and to relate sounds to each other because they appear to have shared or associated origins », car « music is a cultural construct, and an extrinsic foundation in culture is necessary so that the intrinsic can have meaning. The intrinsic and extrinsic are interactive » (Smalley, 1997).

Les modèles physiques, donc, à partir d'identités connues, se réfèrent à des connexions extrinsèques dans des degrés croissants d'incertitude et d'éloignement de la réalité. Les instruments ainsi manipulés dans leur identité constitutive sont soumis à des augmentations de taille, des distorsions de forme, des croisements et des hybridations, des suppressions ou des amplifications de qualités timbrales particulières : c'est la génération d'une véritable lutherie de substitution aux traits potentiellement anormaux et ouverte à des solutions totalement impossibles dans la réalité physique, nourrie par une imagerie multiforme et bigarrée à laquelle les techniques de modélisation offrent la possibilité de se traduire en artefacts.

Le diagramme 3.1 montre la lecture des instruments virtuels, avec leurs implications de type gestuel et perceptif, proposées et discutées en détail dans ce chapitre. En particulier, le concept de plausibilité en tant qu'espace partagé dans lequel gravitent toutes les différentes solutions rencontrées, du réel à l'abstrait, a été mis en

évidence par rapport à ce qui a été dit dans ce paragraphe. Au cours du chapitre, ce schéma sera utilisé à plusieurs reprises et, dans l'économie générale de la discussion, il joue le rôle d'un véritable schéma général.

3. 3 Gestes étendus, hybrides et abstraits

Selon les études les plus récentes en psychologie de la perception musicale, le processus perceptif ne semble plus être structuré uniquement sur les caractéristiques formelles de l'objet perçu, comme l'affirme par exemple la théorie de la *Gestalt*, mais aussi par une interaction corporelle-gestuelle qui facilite l'appropriation du sens et, en même temps, favorise les mécanismes de *disambiguation*. En particulier, dans le sillage des études de psychologie de la *Gestalt* des années 20 et 30, Gibson a assumé l'idée que les sens peuvent être considérés comme des systèmes perceptifs directs qui capturent les éléments invariants de l'environnement qui, à leur tour, fournissent des informations sur les façons dont les objets sont utilisés. Cette approche, fondée sur la détection plutôt que sur la sensation de l'information dans le monde quotidien, met l'accent sur la manière dont l'information sur un environnement est révélée à l'observateur par un ensemble de paramètres tels que l'énergie, les rapports et les proportions, paramètres qui permettent d'identifier les *affordances* ou opportunités, constituées des fonctions et des valeurs de l'objet offert au sujet dans une relation de complémentarité entre ce dernier et son environnement.

Cette perspective écologique, qui se concentre sur la perception des formes d'actions entre les objets et les phénomènes dans l'environnement, a pris une importance particulière au cours des trente dernières années avec le paradigme de la *cognition musicale incarnée* (EMC), qui s'est avéré central pour l'étude de la perception musicale. Développant à la fois l'approche cognitive et la tradition phénoménologique, l'EMC a mis en évidence la physicalité du corps comme médiateur essentiel de tout acte cognitif, conçu comme un continuum perceptif agissant dans un environnement donné. L'acte perceptif, ainsi conçu, se réfère, de manière plus ou moins elliptique, à une action réelle, présumée ou simulée, qui constitue une référence essentielle pour une discrimination auditive qui, toutefois, s'avère être culturellement orientée.

Du point de vue de la problématique de cette recherche, il convient de souligner comment la référence médiate et indirecte à la corporéité devient particulièrement significative lorsque l'entrée perceptive est par nature ambiguë, comme celle produite par le monde électroacoustique, puisque la référence aux mouvements du corps, idéalement sous-jacents à tout acte de production sonore, et aux « anticipations » sensorielles relatives, activent une *disambiguation* de l'information perçue.

Selon l'EMC, outre l'implication corporelle, la dimension de la reconnaissance prédictive se nourrit également de toute une série de conditions environnementales. A cet égard, le modèle développé par Marc Leman a montré comment les processus d'action/perception peuvent rendre non ambiguës les relations stimulus-source rencontrées dans l'environnement. Poussant plus loin ces perspectives, Arnie Cox propose une structuration des processus d'écoute fondée sur l'incarnation, l'imitation et la pensée métaphorique. Cela implique que, d'une part, l'expérience sensori-motrice limite fortement notre capacité à penser la musique et, d'autre part, que les métaphores par lesquelles nous rapportons à notre discipline jouent un rôle crucial dans le processus de signification musicale.

Plus précisément, la lecture de la cognition incarnée proposée par Leman et Cox est particulièrement féconde pour le contexte dans lequel s'inscrit la présente recherche car elle permet de justifier, à un niveau théorique, combien le geste sonore est profondément enraciné dans les structures perceptives validées culturellement. Le geste finit donc par jouer un rôle essentiel, même dans la musique électroacoustique, où il est présumé, ou pour reprendre la terminologie de Smalley, soumis à une substitution de troisième ordre — geste imaginé ou inféré — et de substitution de quatrième ordre (*substitution éloigné*) — geste complètement éloigné de tout lien avec l'humain. Mais c'est précisément dans ces dernières traces éparses de gestes que l'on peut trouver des liens avec la dimension archétypale d'un geste primordial non encore expressément musical, qui se définit comme une substitution de premier ordre, le second ordre étant typique d'un geste musical socialement validé. Et c'est précisément dans cette référence à la source de tous les gestes possibles que la musique électroacoustique, lorsqu'elle semble la plus éloignée de l'humain, s'associe au contraire à l'humain lui-même, réaffirmant sa centralité de manière elliptique et, en fait, substantiellement ambiguë.

La fécondité créative de cette ambiguïté structurelle, qui est en même temps la fragilité et l'incertitude de la donnée perceptive, est saisie dans toute sa plénitude par la modélisation physique. Ainsi, les gestes déclenchés par la vaste topologie des instruments virtuels sont également lus au nom de cette relation perceptive qui repose sur la dimension corporelle, bien que médiatisée, et sur sa métaphorisation culturellement orientée.

Il s'ensuit que les mécanismes de production sonore du modèle — qui impliquent la réplique de mécanismes existants et leur extension au-delà des limites du monde physique, jusqu'à la création d'actions et de mécanismes qui n'existent pas dans la réalité physique — et par conséquent, les gestes, ou (au sens large mais dans ce contexte substantiellement analogue) les actions impliquées dans la mise en œuvre du modèle, se réfèrent inévitablement aux modes de substitution de gestes codifiés par Smalley.

Impliquant des processus d'interaction avec l'instrument très différents, tant du point de vue de la production que du point de vue de la perception, tous les gestes instrumentaux, bien que relevant d'une structuration et d'une fonctionnalité propres, témoignent dans l'ensemble d'un rapport fondateur avec les processus d'abstraction du réel. Ces processus, qui peuvent être articulés, tout comme les instruments virtuels, selon le modèle introduit par Kohn d'action étendue, hybride et abstraite, sont situés dans des zones de pleine congruence/incongruence avec le monde physique, produisant des résultats perceptifs différents et ambigus, qui renvoient à la relation complexe avec la source, analysée par Smalley. Une fois encore, la référence au schéma général 3.1. résume, dans l'immédiateté de l'image, notre lecture. Il est ainsi possible d'embrasser, d'un seul coup d'œil, le processus d'éloignement de la réalité ainsi que la schématisation des gestes corrélés.

Relire, donc, les différentes déclinaisons de la distanciation de la réplique du modèle par rapport au réel, telle qu'elle a été retracée, en ce qui concerne les instruments, dans le deuxième chapitre, est une stratégie utile pour rendre compte de combien les gestes qui se dénouent dans la frontière très floue entre réel/virtuel, analogique/numérique peuvent, dans la multiplicité des agencements analysés au cours de la recherche, contribuer aussi à investiguer la relation complexe, tant au niveau de la retombée performative du modèle, qu'au niveau de sa perception, entre la dimension du réel et la dimension de la modélisation.

Ainsi, les actions virtuelles qui étendent le modèle — basé sur des simulations de processus physiques de nature unidirectionnelle congruents avec le monde physique — peuvent idéalement être abordées au niveau de la substitution de second ordre, qui se réfère à des modes de performance qui, bien qu'altérés, sont toujours reconnaissables sur la base de coutumes culturellement validées. En revanche, les actions hybrides, de nature multidirectionnelle et incongrues avec le monde physique, impliquant la restructuration et la subdivision du flux énergétique du modèle, entraînant une incertitude quant à la manière dont le son a été produit et la trajectoire mouvement-énergie appliquée, et peuvent être abordées au niveau de la substitution de troisième ordre. Enfin, les actions virtuelles abstraites, qui impliquent des processus de transduction énergétique à l'intérieur de systèmes produisant du son à partir d'éléments directement matériels et dans lesquels toute entité peut vibrer dans un ordre complètement fluide et arbitraire, transcendant l'ordre du monde pour constituer une réalité complètement différente, peut être lue au niveau de la *substitution éloigné*, dans laquelle, en vertu de l'éloignement total du geste, de la source et de la cause, désormais inconnus et inconnaissables, toute trace d'activité humaine sous-jacente au son disparaît. En réalité, cependant, comme nous le verrons dans la suite de ce chapitre, ce dernier niveau, dans une sorte de circularité idéale, est elliptiquement rejoint par le premier, constitué par une sonorité libérée d'un contexte musicalement organisé, en ce sens que, là où la référence à ce qui résulte être culturellement validé devient incertaine et insaisissable au point de devenir absente, le lien avec la source se constitue dans le retour à une sorte d'expressivité gestuelle archétypale qui va au-delà de tout contexte culturellement défini.

Afin d'illustrer plus en détail la première catégorie d'instruments étendus, nous examinerons la composition *Corda di metallo* de Michelangelo Lupone (§2.2.1.1), puisque les solutions gestuelles utilisées par l'auteur, à travers le dialogue établi entre les mondes acoustique et virtuel, se situent sans équivoque dans le deuxième niveau de substitution de Smalley, même dans l'ambiguïté qui dérive de l'entrelacement de gestes connus avec d'autres complètement nouveaux provenant de l'interaction entre les instruments acoustiques et le modèle. Cet exemple concerne les sonorités culturellement validées, dont le résultat est une cohérence structurelle solide et

naturelle du modèle. Les gestes utilisés pour étendre les possibilités timbrales des instruments physiques existants constituent une réalité augmentée générée par l'entrelacement d'instruments virtuels et réels dans la performance, dans laquelle l'auditeur est constamment mis au défi d'identifier, à un niveau perceptuel, si le matériel présenté est acoustique ou virtuel.

Les gestes étendus, entre réalité et abstraction, ont été efficacement exploités pour créer des espaces de résonance virtuels, comme dans le cas de *That Which is Bodiless is Reflected in Bodies* (2004) de Matthew Burtner (§ 2.2.1.8), dans lequel le modèle d'une cloche tibétaine est étendu pour coïncider avec la totalité de l'espace physique, créant un espace dans lequel l'auditeur est totalement immergé. Ainsi, Burtner exploite les gestes pour produire une saturation perceptive créée par l'instrument réel, exécuté avec des actions cohérentes avec le monde physique, et par un espace acoustique artificiel, spectralement cohérent avec l'objet modélisé et changeant continuellement de forme et de taille pendant la performance. Ce processus peut être interprété selon le concept d' "espace immersif" de Denis Smalley. Grâce à cette immersion, le geste est transfiguré en un espace spectral et perspectif qui s'étend jusqu'à entourer le sujet qui, à son tour, n'étant attiré par aucune direction précise, est poussé à adopter des points d'écoute différents et multiples.

Dans les actions virtuelles hybrides — caractérisées, en revanche, par des parcours multidirectionnels, qui renversent l'ordre naturel des interactions physiques — on rencontre un geste complètement différent, comme, par exemple, dans *Air Study I* (2001) de Gary Scavone, où la pression exercée sur l'anche d'un saxophone, produite par le souffle à l'intérieur de l'instrument, excite et contrôle une paire de cordes virtuelles. La possibilité de construire des instruments virtuels arbitrairement complexes à partir de blocs de construction plus élémentaires permet ainsi d'explorer une palette riche et diverse de possibilités spectrales. De plus, puisque le résultat est exprimé en termes d'informations modales, on a la possibilité supplémentaire d'utiliser ces dernières pour déterminer des décisions 'harmoniques', directement liées aux caractéristiques spectrales des sons produits en réponse à l'excitation et à la collecte de la réponse vibratoire de l'instrument virtuel en des points arbitraires de sa surface. Ces blocs ne sont donc pas seulement utilisés comme générateurs de sons, mais ont également un rôle fonctionnel en déterminant le contenu spectral et la forme de la pièce. Cependant,

dans le contexte de la modélisation, l'idée d'un son et d'un timbre intégrés au processus de composition — qui finit par coïncider avec la composition du son et du timbre elle-même, dans une continuité idéale avec le travail de Risset, qui a démontré tout le potentiel de la synthèse sonore numérique pour la création de matériaux idiosyncrasiques fondant des procédures de construction de formes — est traduite en termes spectromorphologiques : les interactions entre les spectres sonores et la façon dont ils changent et sont façonnés au fil du temps sont interprétées comme le moyen d'identifier la source présumée des sons, plutôt que dans le contexte de l'harmonie, comme ce serait typique, par exemple, avec la composition spectrale. Ainsi, ces dynamiques spectrales, générées dans l'intersection arbitraire de motifs hybrides, articulent la forme sur un autre plan, recréant, par l'accent mis sur les caractéristiques timbrales et microstructurelles distinctives du son, la complexité du réel et permettant à l'auditeur de se reconnecter avec le monde de l'expérience vécue.

Tous les exemples discutés ci-dessus, bien que composés à la fois de gestes congruents avec le monde physique et de gestes incongruents avec le monde physique, restent dans le domaine de la plausibilité, nourris par cette ambiguïté-incertitude qui renvoie aux deuxième et troisième niveaux de la substitution gestuelle, pour faire référence une fois de plus à la terminologie de Smalley.

Les actions abstraites, en revanche, tout en étant physiquement plausibles, sont en supra-congruence avec le monde physique, dans le sens où, à l'intérieur de systèmes caractérisés par la transduction d'énergie d'où émergent des séquences temporellement organisées entre des composants de nature très diverse, étant entièrement dans le domaine du virtuel, elles créent un autre monde qui agit à un niveau super-ordonné par rapport au monde physique [diagr. 3.1]. En assemblant des particules élémentaires, on peut obtenir un modèle capable de synthétiser des sons qui n'ont absolument aucune contrepartie réelle, de sorte qu'un modèle basé sur la physique peut être considéré comme un générateur de réalité musicale, interprétable, ici, par un processus de métaphorisation d'objets réels.

Comme l'a montré Cadoz, une succession d'événements sonores, plutôt qu'un son isolé, peut être obtenue en assemblant, dans une structure complexe, à la fois des motifs à haute fréquence qui génèrent un son et des motifs à basse fréquence qui génèrent des événements sonores (le geste). Exemple, d'ailleurs, *pico..TERA* (§ 2.2.2, 2.2.2.1) :

morceau entièrement généré, en Genesis, par un seul modèle, sans aucun post-traitement, dans lequel le musicien est en mesure de construire ses propres générateurs d'événements sur les deux niveaux, audio et gestuel, de la création musicale, jusqu'à l'organisation d'une macro-gestualité contrôlant tous les aspects de la forme.

Les actions impliquées dans l'instrument virtuel abstrait se révèlent donc être des principes d'organisation qui influencent chaque aspect de la création musicale, de la composition à l'écoute en passant par l'exécution. Toute structure, particule ou phénomène vibrant possible, sous ses formes latentes et actives, à l'intérieur d'un système fluide de transduction de l'énergie, peut être la source d'une action qui peut être activée à n'importe quel stade, abandonnant ainsi le flux traditionnel entre la composition, l'exécution et l'écoute : l'écoute, par exemple, peut initier la vibration et mettre en mouvement les autres composantes de l'action ; la forme d'un instrument peut devenir la forme de la composition ou, encore, un instrument peut frapper un interprète.

Tous les aspects de l'action partagent la même structure sonore, construisant ainsi une expressivité gestuelle totalement fluide, transcendant les contraintes de la réalité, qui renvoie à la *substitution éloigné* : le geste reconnecté à sa fonction archétypale pré-musicale qui utilise tout le potentiel de la métaphore. Les combinaisons et les transfigurations de sons reconnaissables font appel aux associations et aux expériences culturelles et environnementales des auditeurs de manière à générer des métaphores et à évoquer des symboles. Ainsi, la métaphore agit comme un mécanisme compensatoire, à un niveau subjectif, par lequel une relation expérientielle culturellement orientée avec l'inconnu peut être reconstruite, déchiffrée et appréciée.

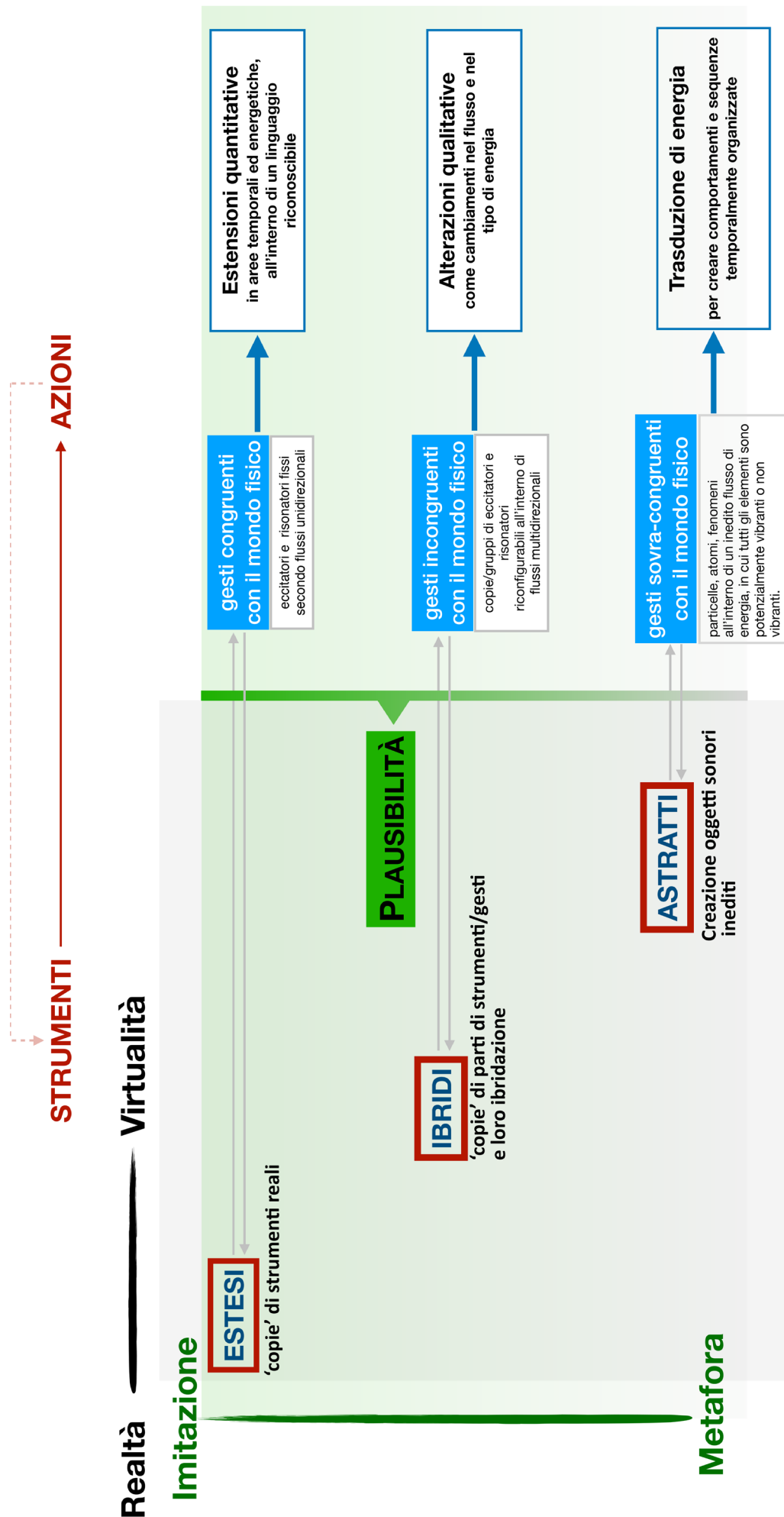


Diagramme 3.1 Correspondance entre les instruments virtuels et les actions, décomposée en fonctions internes, directionnalité et flux d'énergie.

3.4 Espaces compositionnels entre le concret et l'abstrait

Si, comme nous l'avons vu, le concept de plausibilité physique est lié au niveau de réalisme attribuable à un son synthétisé, ce dernier se situe à l'intérieur d'un *continuum* dont les polarités sont constituées, d'une part, par les sons immédiatement reconnaissables comme étant de nature physique et, d'autre part, par ceux qui, ne pouvant être clairement associés à une interaction physique définitive ou à un objet matériel, invoquent une abstraction totale. Cette abstraction peut être interprétée comme la distance psychologique entre un son qui présente une ambiguïté de cause-source et un modèle de cause-source supposé, fournissant un *moyen* de naviguer entre les différents niveaux de substitution. Le compositeur travaillant avec des instruments virtuels se situe dans ce *continuum*, qui s'avère être une construction conceptuelle utile pour reconnaître la réalité/abstraction d'un son synthétisé, qu'il reste dans le domaine du plausible ou de sa transcendance progressive à travers l'utilisation de plus en plus pervasive et globale de la métaphore. L'action métaphorique s'intensifie dans la tension vers l'abstrait, tandis que, à l'inverse, elle tend à se réduire là où la reconnaissabilité du son apparaît plus immédiate et intrinsèquement évidente : il s'ensuit que la plausibilité physique et la tension métaphorique semblent donc être des concepts qui se rapportent selon le principe de la proportionnalité inverse.

Le concept de métaphore se constitue dans la relation de similitude entre les champs d'images sonores qui relient le son proprement entendu au son réel auquel ce dernier se réfère. Plus la relation entre ces deux images sonores est directement reconnaissable, plus la polarité du *continuum* relative à la nature physique du son est favorisée ; tandis qu'à l'inverse, plus la relation apparaît elliptique, médiate et aliénante, plus on gravite vers les territoires de la polarité opposée de l'abstraction.

Dans ce *continuum*, deux articulations différentes de la réalité et de l'abstraction sont possibles, appelées *médiation* et *juxtaposition*. La médiation se produit par des changements graduels dans l'ordre de la substitution, qui sont perçus en termes de devenir progressif d'un certain nombre d'identités sonores distinctes, ou comme une transformation d'une identité spécifique ; la juxtaposition, d'autre part, utilise une combinaison de sons typiques sensiblement polarisés, opérant soit séquentiellement soit simultanément. Dans les contextes musicaux, ces articulations peuvent se côtoyer,

sans s'exclure mutuellement, de sorte que l'attention de l'auditeur peut librement graviter d'un type d'articulation à l'autre au sein d'une même œuvre.

Virtual String (1997), d'Achim Bornhoeft (§ 2.2.1), fournit un exemple significatif de la gestion du *continuum* réalité-abstraction à grande échelle, marqué par la transition vers des sons réalistes à partir de matériaux de troisième ordre et la *substitution éloignée*. Tutschku, dans *Eikasia* (§ 2.2.1), partant de l'idée de recréer la complexité sonore d'une source réelle par synthèse pure, compare les modèles synthétisés avec les sons originaux, créant ainsi une large palette sonore allant de l'abstrait au réel. Toute la pièce utilise des cymbales accordées à des spectres de cordes et des cordes accordées à des spectres de cymbales. Dans le *Garden of Dragon* de Kojs, le modèle de tuyau ondulé, mis en œuvre en tant qu'extension de l'environnement temps réel Max/MSP, étend les possibilités des tuyaux physiques dans plusieurs domaines : vibrato, contrôle de la hauteur et de l'amplitude, et rapport bruit/hauteur. Les tubes acoustiques contrôlent un chœur de tubes virtuels à l'aide d'un tracker Max/MSP pour créer une interrelation symbiotique entre les deux dimensions.

Alors que ces projets se situent sur la crête perceptive qui sépare/unit le réel et l'abstrait — par le biais de modèles qui interprètent de manière créative la transition, au sein d'un *continuum* spatial —, beaucoup d'autres se situent ouvertement dans des zones abstraites, au sein desquelles les modèles peuvent entrer dans des états marginaux et chaotiques dans lesquels la production musicale est articulée et souvent surprenante. C'est le cas, par exemple, de *Hero and Leander*, de Chris Burns - centré sur un réseau de *feedbacks* qui produit des sons émergents articulés et totalement imprévisibles. Ou encore, des combinaisons polyrythmiques sont produites dans *Wadi Musa* de Reyes, grâce à la flexibilité du modèle, qui permet de générer différents timbres allant des maracas en bois ou en plastique avec des parties synthétiques, aux tambourins et aux boîtes à musique, assemblés en combinaisons chaotiques qui font interagir les durées, les vitesses d'agitation, les quantités de graines et les résonances de la coque des maracas.

Les modèles les plus abstraits sont composés de réseaux de modules en interaction, qui répondent exclusivement aux propriétés spécifiques de leurs parties constitutives et de leurs combinaisons : en s'éloignant ainsi de toute référence connue, ils donnent naissance à des sonorités abstraites qui ne correspondent pas du tout à la

réalité physique et qui, bien qu'elles puissent conserver des traces de leur origine, doivent être apprises à partir de zéro. Ce qui les caractérise est donc l'émergence de sonorités qui jaillissent d'une action compositionnelle qui se déplace de préférence dans la création du support et de sa mise en œuvre plutôt que sur l'effet : le son émerge jusqu'à surprendre avec des sonorités totalement inattendues, autonomes en elles-mêmes et bien ancrées dans la physicalité des mécanismes qui les génèrent.

Cette façon de procéder constitue une "pensée physique" qui peut atteindre la complexité du son naturel par des processus de synthèse pure, comme le dit explicitement Tutschku à propos de son *Eikasia*, ou faire dériver un son émergent d'un objet préexistant, comme dans *Sonomorphis*, une installation interactive en 3D de Torsten Belschner et Bernd Lintermann, dans laquelle une technique de modélisation physique est utilisée pour rendre à la fois le son authentique d'un objet visible à travers toutes les modifications plausibles de la forme et de l'espace introduites par l'utilisateur, et pour être suffisamment abstrait, le cas échéant, pour ne pas reproduire un artefact du monde réel. Il s'agit d'une manière d'imaginer et de concevoir la musique qui découle de l'expérience, mais avec un cheminement qui va au-delà de cette expérience.

Cadoz étend ce paradigme unique à la synthèse sonore et à la composition assistée par ordinateur. La construction d'une pièce dans cette approche repose sur la construction de catégories de composants — les instruments et les interprètes, correspondant à deux échelles temporelles différentes, celle de la microstructure et celle de la macrostructure — qui rassemblent et relient des éléments définis hors du temps (les différents MAS et interactions). En agissant sur cet axe de liberté, le compositeur peut appliquer des choix arbitraires ou des règles de toute nature : par exemple, pour l'ensemble des huit *triangles*, instruments utilisés dans *pico..TERA* pour le fond harmonique, une loi pragmatique fondée non pas sur les hauteurs mais sur leurs propriétés topologiques a été employée, créant une harmonie de causes et non d'effets.

Tous les processus de construction sont donc possibles aux différents niveaux de la structure musicale, ce qui ouvre un nouveau paradigme : la gestion des rencontres interactives entre les différentes scalarités, dans lequel les échelles elles-mêmes ne sont pas conçues exclusivement en termes de structures temporelles, mais peuvent également être phénoménologiques et causales. Ainsi, ce paradigme unique basé sur un très petit nombre de concepts et de fonctions de base peut être utilisé pour la

construction musicale, de la micro à la macrostructure, sans rupture, provoquant un changement radical de focalisation : le point de départ de la modélisation physique, consistant à penser et à agir sur les causes plutôt que sur les effets, est maintenant appliqué à la totalité des paramètres qui constituent la créativité musicale.

Dans ce paradigme compositionnel — dans lequel un modèle unique pour la génération des différentes catégories de phénomènes garantit la cohérence énergétique entre les phénomènes — le concept d'émergence des sonorités devient plus radical, car le son est délimité dans une interrelation intime avec d'autres dimensions de la réalité virtuelle, où l'objet sonore peut être simultanément vu, entendu et manipulé, même en temps réel (§ 2.2.2). Les œuvres de Cadoz telles que *Hélios*, *Quetzalcóatl* (§ 2.2.2.3), parmi les différents exemples possibles de production du centre ACROE, sont emblématiques d'une telle redéfinition de l'acte de composition, rendue possible par la création spécifique d'*Hélicanthe*, la plateforme de création musicale et artistique multisensorielle, dans laquelle l'abstrait pur s'offre aux sens avec de nouveaux objets et de nouveaux gestes, au sein d'un nouvel espace totalement immersif (§ 1.3.2.1).

Libéré des limites physiques et corporelles de la réalité, ainsi que des contraintes culturelles, le modèle physique, grâce au réseau d'interactions sensorielles qui le rendent possible, vivant et présent dans la représentation mentale, s'ouvre à un espace compositionnel, au sein duquel virtuel et réel, imitation et métaphore, corps et esprit s'entremêlent, devenant des polarités inséparables qui peuvent être pleinement investiguées pour explorer l'inédit dans la créativité artistique.

3.5 Trois études de cas

3.5.1 La Corda di Metallo de Michelangelo Lupone : une quête musicale et scientifique

Avec *Corda di metallo* (§ 2.2.1.2) pour quatuor à cordes, une synthèse fondée sur des modèles physiques et un dispositif de spatialisation, le compositeur Michelangelo Lupone a réalisé l'une des premières et des plus intéressantes expériences sur l'utilisation de la modélisation physique dans le domaine de la composition, à travers la simulation d'une corde excitée par un archet, résultat de l'expérimentation de l'équipe

musicale et scientifique du CRM de Rome. Cette pièce, qui est un véritable exemple de *lutherie virtuelle*, démontre combien la nature de l'instrument virtuel peut contribuer à la conception et, par conséquent, à la construction du langage.

L'idée musicale était d'explorer l'intérieur de la corde afin de mettre en évidence le potentiel timbral de son matériau de construction. En mettant en œuvre une transformation spectrale, sans solution de continuité, de l'acier au métal, le but était d'expérimenter le potentiel compositionnel des variations acoustiques produites par les différents rapports tension-densité, ainsi que celles indépendantes de la vitesse, de la pression et du point d'intervention de l'arc.

Partant de ces intentions, les physiciens Palumbi et Seno ont proposé une réinterprétation de l'équation caractéristique de la technique du guide d'ondes, centrée sur la variance temporelle des équations descriptives des paramètres physiques, dont les potentialités ont été exploitées par l'idée musicale, en appliquant des fonctions de contrôle à tous les termes de l'équation selon une double stratégie qui a conduit à d'une part, à la réalisation des modalités d'émission typiques des instruments réels, en suivant les contraintes physiques des gestes instrumentaux, et, d'autre part, à la réalisation de la bande magnétique, en suivant les contraintes de cohérence dérivant de l'ordonnancement des matériaux prévu par la partition. La lecture de la partition révèle une écriture très formalisée, qui établit différents modes d'émission sonore et de gestes d'exécution typiques des instruments du quatuor, selon le déroulement, dans les sections où se rencontrent sons physiques et virtuels, d'une texture construite sur la relation de continuité/fusion des sons de la corde modélisée avec les sons des instruments réels.

En fonction de ce timbre, contrairement à ce qui semblerait naturel, il est intéressant d'observer comment c'est de l'étude scientifique de l'instrument virtuel que le compositeur a tiré certaines des modalités et des gestes employés par les instruments acoustiques, à travers un processus d'organisation paramétrique découlant de la formalisation du modèle virtuel lui-même : ainsi le système d'archet virtuel est idéalement adopté par le système d'archet physique. A la lumière de cette relation circulaire établie entre l'instrument virtuel et les instruments acoustiques, l'émergence timbrale du métal, commune aux deux, découle donc d'un alignement paramétrique des instruments acoustiques avec l'instrument virtuel et/ou vice-versa.

En ce sens, l'organisation paramétrique hybride - qui comprend à la fois des éléments issus de la recherche sur les gestes idiomatiques des instruments du quatuor et des éléments issus d'expériences sur le modèle physique - représente l'un des éléments syntaxiques fondamentaux de la pièce, constituant la 'colle' qui structure à la fois les matériaux de la bande et l'écriture des instruments acoustiques. L'instrument virtuel est ainsi devenu un moyen de langage nécessaire et irremplaçable pour répondre aux besoins expressifs de l'auteur.

Déjà à la fin des années 1990, la pièce semble avoir profondément innové à la fois dans les techniques et les perspectives du langage musical, tous deux expérimentés en étroite symbiose. C'est précisément cette relation qui donne lieu à la fécondité expressive et artistique de la synthèse par modèles physiques, qui se place explicitement sur un plan de redéfinition du langage musical, en dialogue étroit avec ce dernier.

3.5.2 Composition de la cyber action par Juraj Kojs

Puisque le modèle physique incorpore la représentation de l'instrument et du geste, il est presque naturel qu'une partie de la production musicale soit orientée vers l'étude du potentiel créatif des gestes. Ce dernier point peut être considéré comme étant au cœur de la recherche de Juraj Kojs, dont la musique est fondée sur l'application de gestes à l'exploration d'objets, d'instruments de musique et d'actions liés à des phénomènes environnementaux, qui deviennent les principaux moyens de son expression musicale : le compositeur, plutôt que d'étudier des paramètres sonores particuliers, privilégie en fait les actions performatives, qui constituent le centre de son action créatrice, en les explorant et, en même temps, en les transformant.

Le substrat théorique dont découle sa perspective est précisé, par l'auteur lui-même, dans son article *The Language of Action and Cyberaction-based Music : Theory and Practice* dans lequel il tente de lire les particularités de la musique fondée sur l'action, en se basant sur le concept d'*affordance*, ou invitation à l'utilisation d'un objet, déjà abordé au paragraphe 3.3. de ce chapitre, qui théorise la manière dont un environnement ou un objet s'offre au sujet auquel il est potentiellement destiné.

En se reliant idéalement à ce contexte, Kojs explore les actions dans le domaine physique pour extrapoler un vocabulaire qui fonde un langage musical de l'espace virtuel, couplant les actions physiques et les actions simulées dans le monde numérique (§ 2.2.1, 2.2.1.11). Guidées par les subtilités du contact tactile entre l'interprète et l'instrument, les actions peuvent être significativement expressives, stimulant une interaction compositionnelle à multiples facettes.

La *cyber-action composition*, expression inventée par l'auteur lui-même, construit ainsi une syntaxe qui structure et organise une série de techniques et de modes d'exécution pouvant régir tous les niveaux de l'action compositionnelle : des actions physiques telles que secouer, frapper avec des objets en métal, en bois et en plastique (parties en maillet et en bâton), frotter avec un archet de violon et souffler dans une cloche, par exemple, constituent, dans leur ensemble, la trajectoire formelle de *At and Across* (2007), tandis que, les actions musicales produites avec des objets du quotidien caractérisent *Neither Stirred, Nor Shaken* (2007) pour verres à cocktail, shakers, mixeurs et électronique, dans lequel des capteurs sont utilisés pour établir un contact entre les actions physiques des interprètes et les réponses des instruments virtuels par modélisation physique.

Le processus de combinaison d'actions physiques et cybernétiques suggère un *continuum* fluide de réalités physiques et virtuelles, qui se développe par l'augmentation virtuelle de sources physiques pouvant également aboutir à la conception de structures abstraites uniques, ainsi qu'à de nouvelles procédures de composition. Les instruments virtuels élargissent ainsi l'espace de l'action musicale, en participant à la création d'instruments hybrides analogiques-numériques et en fournissant un espace de résonance pour la performance sur l'instrument physique : si dans *Neither Stirred Nor Shaken*, comme nous l'avons vu, les actions sont suivies à l'aide de technologies de capteurs, dans d'autres cas, les instruments virtuels répondent aux gestes et aux signaux fournis par les instruments physiques eux-mêmes en temps réel. Un exemple de ce processus d'hybridation est la pièce *All Forgotten* (2006) pour piano et chœur de marimba virtuel étendu, qui combine les sonorités de l'instrument physique aux limites de l'audibilité avec les sons augmentés des instruments virtuels, qui ne nécessitent donc pas d'interprète spécifique, ni d'exécution spécifique par le pianiste, puisqu'ils réagissent aux articulations gestuelles de ce dernier.

Mais les actions conditionnent également la formulation de la partition dans ses particularités graphiques et prescriptives : lorsque la musique fondée sur l'action est exécutée, l'interprète reçoit des instructions sur comment et quoi exécuter, plutôt que sur l'effet sonore à obtenir. Le corps humain, par exemple, à travers la représentation graphique de ses membres, entre directement dans la partition, articulant la notation des actions d'une manière particulièrement efficace et suggestive. Des tableaux avec des mains engagées dans des actions — représentées à la fois dans leur configuration physique et dans leur transfiguration abstraite — caractérisent toute la partition de *At and Across*. Une telle notation révèle le fonctionnement interne de la musique en se concentrant sur la mécanique réelle de la production du son, en cherchant à spécifier et à rendre intelligible les interactions entre les instruments et la richesse des possibilités expressives qui en résultent.

La *cyber-action composition* postule donc un type de musique dans lequel la conscience de la source de production du son, ou la conscience des aspects perceptifs et phénoménologiques du son, est essentielle, puisque la référence constante à la dimension de l'action est le moyen choisi par le compositeur pour incorporer l'humain dans le virtuel : c'est en effet par l'humanisation du virtuel accomplie par l'action que le son, malgré son altérité abstraite, peut continuer à entretenir un lien archétypal avec une dimension primordiale de la sonorité étroitement liée à la quotidienneté de l'existence, qui est en même temps la reconnaissance d'un lien perceptif 'préculturel' caché, dans la mécanique même de la production du son, de son être mouvement, en expansion dans l'espace, sans adjectifs.

3.5.3 Entre formalisation et imprévisibilité : Mauro Lanza et la poétique des effets secondaires

Mauro Lanza expérimente pour la première fois l'utilisation de modèles physiques dans *Erba nera che cresci segno nero tu vivi* (1999/2001), pour voix et électronique, où la voix est accompagnée par une sorte d'orchestre gamelan virtuel, fruit d'une synthèse de modèles physiques résultant de l'expérimentation du logiciel Modalys, qui a offert au compositeur la possibilité, comme cela s'était déjà produit avec des instruments jouets

dans les pièces du même cycle compositionnel, de travailler avec de nouveaux instruments aux résultats sonores inattendus. Grâce à Modalys, le compositeur est donc encouragé à construire les instruments qui seront utilisés dans sa musique, devenant ainsi une sorte de luthier qui manipule directement les dispositifs mécaniques qui génèrent les sons, plutôt que d'intervenir sur les sons eux-mêmes. Dans ce sens, l'auteur, en exploitant le potentiel de Modalys, modifie les structures instrumentales préconstituées et hybride les différents composants des modèles avec de nouvelles voies.

La gestion de ces complexités, qui part, comme nous l'avons vu, de la récupération de la dimension artisanale de la lutherie, est mise en œuvre par des processus de composition assistée (CAO) qui impliquent l'utilisation d'OpenMusic et de Lisp. L'interface créée par Lanza pour contrôler Modalys à partir d'OpenMusic — en utilisant une programmation, comme l'indique l'auteur, de préférence textuelle ou même graphique, pour les travaux plus rapides — semble être cruciale pour les processus de construction de la pièce, puisque l'utilisation du même environnement permet d'appliquer le même formalisme à la fois à la partie instrumentale et à la partie électronique, permettant une forme de représentation de haut niveau, consistant en une partition informatique, qui contrôle, à son tour, plusieurs moteurs de synthèse.

La créativité de l'auteur dans cette pièce semble fonctionner au même niveau de règles et de principes bien définis. En effet, grâce à l'utilisation de modèles physiques, une complexité virtuellement illimitée est créée avec un ensemble de règles très réduit, produit par les contraintes mêmes de l'algorithme de modélisation, une limitation qui permet au compositeur de recourir, même au niveau numérique, à un système de reproduction imparfait recherché auparavant dans la fragilité des instruments-jouets.

La complexité hétérophonique recherchée par Lanza trouve ainsi son expression dans le formalisme du monde numérique, qui lui permet non seulement de produire de nouveaux sons, mais aussi d'initier des processus organisationnels complexes, comme par exemple dans des œuvres telles que *Aschenblume* (2001), *Vesperbild* (2006-7), *I funerali dell'anarchico Passannante* (2006), *Descrizione del diluvio* (2007), *Burger Time ou les tentations de St. Antoine* (2001/2008), qui utilisent des modèles physiques pour obtenir un élargissement significatif du timbre et de l'expression, ainsi que pour redéfinir le langage en profondeur, donnant voix à un univers de sons nouveaux, nobles

ou triviaux, qui révèlent tout l'émerveillement de l'inattendu à l'horizon du sensible. Ces matériaux sont gérés, à leur tour, par des processus abstraits de plus en plus formalisés, dans un paradoxe apparent qui lie, dans une rétroaction continue, imprévisibilité et organisation, surprise et planification, jusqu'à l'exploration, dans les dernières œuvres, de structures harmoniques résultant d'analyses géométriques générées avec la bibliothèque d'éléments finis Modalys, comme, par exemple, les accords dérivant des *bandes de Möbius* utilisés dans *Experiments in the Revival of Organisms* (2019), pour orchestre.

L'utilisation de spectres de modèles physiques sous-jacents aux instrumentations, qui semblent à première vue tout à fait traditionnels, est un mode auquel Lanza est resté fidèle au fil du temps : d'*Aschenblume*, à *The skin of the onion* (2002), de *#9* (2009) au *Discorso di Gagarin attorno alla Terra* (2017), pour deux pianos, dans lequel des spectres de plaques carrées sont exclusivement utilisés. En observant le grand ensemble d'*Experiments in the Revival of Organisms*, par exemple, il ne semble pas que la structure interne de la pièce émane de l'utilisation de techniques algorithmiques aussi fortement formalisées. Le paradoxe que Lanza introduit dans ces œuvres est celui d'une présence fondatrice qui se constitue dans l'absence : le rôle que la synthèse par modèles physiques a joué dans la redéfinition du langage apparaît si profond et si structurellement nécessaire qu'il semble impossible de l'ignorer, même lorsqu'il n'y a aucune trace matérielle des sonorités constituées par ces procédures. Cette libération de toute matérialité directe exprimée par les moyens techniques semble remplir une fonction structurante fondamentale, qui revient ensuite, de manière elliptique, à cette matérialité précédemment dissimulée.

3.6 Conclusions

Bien que de manière plus ou moins directe et avec des résultats artistiques différents, les compositions des trois auteurs semblent être centrées sur des mécanismes de production sonore que la nature même du modèle suggère et favorise : Lupone les met en relation avec les techniques d'exécution étendue des cordes ; Kojis les contextualise par rapport à un acte archétypal et pré-linguistique ; Lanza, en revanche, tout en partant

également du geste virtuel, les met en relation avec des techniques de formalisation sophistiquées, pour ensuite les sublimer à travers la mise en scène d'objets mathématiques abstraits dans l'espace virtuel qui, paradoxalement, peuvent également résonner à travers les instruments traditionnels de l'orchestre.

Les diverses références à une action complexe qui devient un geste musical intentionnel ouvrent de nouvelles voies dans lesquelles la modélisation physique se situe au sein même du processus de création et de la formalisation du langage, produisant des résultats qui, bien que très différents, s'inscrivent tous, d'une part, dans la virtualisation des processus de création et, d'autre part, inversement, dans leur réactualisation même : si les éléments de la formalisation du langage sont traversés par le contrôle du numérique, dans la trame du formalisme binaire, en revanche, dans un parcours inverse, ces formalisations elles-mêmes retombent dans le domaine du monde physique, dans les champs proches de la perception, de la construction d'artefacts et de leur redéfinition, idéationnelle et organisationnelle, qui ouvrent, en symbiose, à d'autres significations.

C'est précisément cet échange symbiotique entre virtualisation et réactualisation qui ne semble jamais absent des trois cas analysés : dans tous, en effet, les deux réalités, physique et virtuelle, se sont hybridées en fonction d'un parcours personnel et d'un résultat artistique particulier.

La *Corda di metallo* de Lupone, parmi celles analysées, constitue le premier cas d'un tel échange : l'utilisation de la modélisation de la corde, en tant que composante expressive nécessaire à la réalisation de l'idée fondatrice de l'œuvre, permet la constitution d'une image expressive clairement délimitée — en fonction de l'articulation des paramètres physiques à l'intérieur de la corde, gérables dans l'espace numérique au moyen de l'algorithme de modélisation —, qui réalise toutes les nuances possibles du métal. La restitution sonore de ces artifices, réactualisés dans le réel, reconfigurés par des paramètres physiques définis algorithmiquement, réinterprète, sous un nouvel aspect, les modalités mêmes de l'écoute qui gravitent dans le *continuum*, plein d'ambiguïté, du physiquement plausible.

L'hybridation des deux pôles se fait avec un langage co-constructeur de la réalité : le langage résultant permet de reformuler les intentions, dans un échange idéal qui génère des liens entre les éléments du système, mais aussi entre les différents

interlocuteurs de l'équipe de travail. Une rencontre qui trace de nouveaux chemins, latéraux à ceux déjà battus, mais possibles, parvenant à dérouler une nouvelle manière de se rapporter à l'autre.

Ce qui est révélé, alors, c'est quelque chose qui est *in nuce* de l'idée initiale du compositeur, et qui est redéfini dans la rencontre avec le monde de la technologie. Lupone utilise des modèles physiques pour l'idée du métal et pour la recherche de ces sonorités particulières, en fonction de l'idée initiale de composition, une idée manifestement propre à son temps, issue des possibilités offertes par la technologie d'aujourd'hui.

Les articulations sonores du monde virtuel, qui rencontrent celles du monde réel, ne constituent pas une altérité contrastée, mais donnent lieu à une sorte d'hybridation qui est à la fois une métaphore et un signe de l'homme-machine hybride. Une rencontre à travers laquelle l'art et la technologie, réels et virtuels, s'hybridant, produisent de nouvelles acquisitions tant en termes de connaissances scientifiques — nées de l'imagination même des chercheurs désireux de construire une solution technique pour la réalisation des idées initiales du compositeur — qu'en termes d'élargissement du langage artistique de l'œuvre, qui acquiert de nouvelles articulations et, en même temps, de nouvelles unités de signification.

En ce sens, le langage de Lupone, dans *Corda di metallo*, est redéfini de l'intérieur, se constituant dans une authentique circularité idée-technique-langage. Un langage qui s'étend à de nouvelles articulations, à de nouvelles syntaxes qui ne sont pas le miroir, mais le résultat de nouveaux contenus artistiques et intellectuels. Il s'ensuit que ce n'est pas tant et pas seulement le modèle qui s'étend — selon des buts exploratoires et manipulatoires à la recherche d'articulations timbrales nouvelles et inédites — mais c'est le langage lui-même qui s'étend en fonction des besoins nouveaux et émergents de la pensée.

Les articulations gestuelles obtenues à partir de l'étude du modèle physique, générateur de réalité, qui se répercute dans le réel — dans un processus inverse au processus de virtualisation — font dialoguer le vraisemblable du virtuel avec le tangible des instruments physiques. Et si, dans le plausible, on peut trouver différents degrés d'humanisation des techniques numériques, en référence à des schémas connus (les schémas humains de la tradition) ou inconnus (ceux des hybridations et de l'abstraction

totale), la retombée de ces articulations gestuelles dans le langage, qui est à la fois forme et contenu, accueille différents degrés de virtualisation, dont l'issue est le renouvellement continu de la construction du sens.

Alors que Lupone étudie le modèle physique pour affiner et redéfinir scientifiquement des articulations inédites, en mettant le tout au service d'une idée musicale bien définie, Kojs semble vouloir revenir à une sorte de degré zéro pré-linguistique, en étudiant le monde physique pour extrapoler un vocabulaire d'actions, qui fonderait un langage artistique capable de conjuguer, *ab origine*, les deux domaines, le physique et le virtuel. En ce sens, l'auteur s'inscrit explicitement dans une approche écologique dans laquelle le geste incarné devient le moyen principal d'une expression musicale qui explore non pas tant les articulations technico-gestuelles et instrumentales d'un langage culturellement validé que, à un niveau plus précoce, le geste intentionnellement expressif qui crée le langage.

Partant de la nature même de la modélisation physique, qui se constitue dans la formalisation des mécanismes de production du son, Kojs concentre ses recherches précisément sur l'action et, en couplant action physique et action simulée, crée un nouvel espace d'articulation fluide d'actions physiques et de répliques virtuelles qui s'étendent, se déforment ou se subliment en une syntaxe complètement abstraite. En se concentrant sur l'action, l'auteur déplace l'attention du modèle vers la conduite, ou plutôt, vers la relation entre les objets et les actions. L'objet musical, en effet, ne peut être défini en dehors des conduites qui le constituent.

Si, dans le monde physique, l'activité de production du son passe par une expérience sensori-motrice (bien qu'incarnée), capable de générer des gestes — ces unités sémantico-temporelles qui sont à la base de la construction de la forme —, ainsi, dans le monde virtuel, l'exploration gestuelle (bien qu'incarnée et imaginée) devient le terme à partir duquel construire ces unités syntaxiques nécessaires à la création du langage.

Dans un espace unique au potentiel infini, où réel et virtuel interagissent, le compositeur choisit des gestes, les élargit dans le temps de l'invention, produit des variations, des anamorphismes, les abstrait en des entités complètement nouvelles, développant une production aux résultats totalement inattendus.

S'il est vrai que le langage musical est un ensemble de comportements humains utilisés pour exprimer, représenter ou construire des formes sonores, il est possible de lire le travail de Kojs comme une sorte de méta-langage qui, partant des fondements de la gestuelle, privilégie l'exploration d'actions performatives, plutôt que l'investigation de paramètres sonores particuliers, et dont les liens syntaxiques, tant dans le monde physique que dans le monde virtuel, construisent une expressivité entièrement fondée sur les actions.

Ainsi, dans *At and Across*, par exemple, le langage se constitue par rapport à une forme de symbolisme qui n'a rien à voir avec le réalisme acoustique, mais plutôt avec une gestualité pré-linguistique issue de l'exploration et de l'investissement symbolique d'une gestualité qui devient syntaxe, et qui pourrait idéalement être placée dans le premier des niveaux de substitution codifiés par Smalley. Si Lupone agit à l'intérieur des niveaux deux et trois de la substitution, c'est-à-dire entre le socialement validé et l'ambigu, Kojs semble plutôt graviter entre le premier et le quatrième niveau : entre une gestualité archétypale pas encore proprement musicale et une *substitution éloignée* dans laquelle le lien avec la source sonore, même s'il est complètement elliptique, renvoie rétroactivement au premier niveau. Chez Lupone, donc, le langage, dans la rencontre entre le domaine du réel et le domaine du modèle qui génère le réel, est co-constructeur de la réalité dans la réalisation d'une œuvre qui se constitue sur la crête ambiguë du 'connu-inconnu', tandis que chez Kojs, en revanche, puisque ces deux domaines s'articulent pour construire le langage, on agit à un niveau antérieur qui est constitutivement pré-linguistique, puisque ce sont les gestes, en tant qu'unités sémantiques, d'où jaillit l'investissement symbolique du sens : l'idée compositionnelle.

En déplaçant le centre de gravité vers l'action, Kojs donne vie à un instrument hybride analogique-numérique qui est un espace fluide d'expérimentation à partir duquel sont déclenchées des procédures de composition qui peuvent en venir à articuler une forme qui se constitue dans l'action — comme par exemple dans *Neither Stirred, Nor Shaken* —, et d'élargir le concept même d'instrument pour inclure, d'une part, des objets du quotidien et, d'autre part, pour inventer des entités abstraites qui redéfinissent la dynamique même du processus créatif, en le faisant dialoguer avec les frontières de l'imagination pour recréer un autre monde dans lequel l'instrument, par exemple, peut jouer l'instrumentiste.

De même, la poétique de Mauro Lanza semble construite sur le paradoxe dans lequel les modèles physiques, idéalement liés à la fragilité des jouets musicaux qu'il utilise lui-même, héritent de leurs limites : ce qui contient *in nuce* une potentialité infinie est délimité par une série de contraintes de formalisation qui en provoquent l'imperfection et la marginalité. Contraintes issues d'algorithmes calqués sur les structures de la linguistique générative qui constituent les instruments d'un langage dépassant les moyens traditionnels de construction musicale et les lois mêmes de la physique, s'ouvrant ainsi à l'inattendu, à cet inattendu déjà exploré à travers l'utilisation d'instruments constitutivement parasites en termes de son, de fabrication et de qualité.

Ainsi, Lanza semble repartir du domaine du virtuel, un espace qui lui permet de créer des instruments idiomatiques qui lui permettent de déclencher des procédures de formalisation propres à ce monde capable de traverser tous les différents matériaux, tous les différents objets, qui s'entrecroisent en donnant vie à une partition complexe, qui lie le réel et le virtuel en un seul objet. Si Kojs met en relation ces deux dimensions à travers l'action qui crée le langage, Lanza, en revanche, expérimente la possible coexistence des deux polarités, en partant des langages du virtuel : les procédures de composition assistée, qu'il utilise tant pour la gestion des modèles physiques que pour les instruments et les autres objets de son vaste *instrumentarium*, constituent la stratégie qui rend possible le profond dialogue entre réel et virtuel. Le résultat est un concept d'élargissement de l'instrument qui est absolument radical, absolument fluide et déterritorialisé, encore plus déterritorialisé, fluide et radical que les cas discutés ci-dessus.

Les procédures algorithmiques placent immédiatement Lanza dans la dimension du virtuel, du non-humain, dans laquelle la composition musicale, en tant que processus, traverse les espaces d'une individuation impersonnelle et d'une singularité pré-individuelle, et, en même temps — l'auteur ayant lui-même lucidement programmé l'imperfection des modèles —, produit une résistance qui, paradoxalement et de manière inattendue, réintroduit l'humain dans le virtuel.

Alors que Lupone, par exemple, réalise la réactualisation à travers la comparaison et la redéfinition progressives des techniques instrumentales, qui se nourrissent des possibilités du modèle physique et vice versa, chez Lanza, en revanche, la réactualisation est incorporée dans l'acte même de la programmation initiale du modèle et de sa mise

en œuvre, de sorte que virtualisation et réactualisation, s'incarnant, finissent par coïncider. En ce sens, on pourrait re-fonctionnaliser la définition de la *pensée physique* en termes de pensée compositionnelle qui implique immédiatement la rechute du virtuel dans le réel.

Les processus de formalisation du modèle physique sont stratégiquement et lucidement conçus pour faire ressortir l'impureté du monde analogique de la pureté du monde numérique : des parasites délibérément programmés qui donnent vie à l'inattendu, à cet *side effect* qui finit par surprendre le compositeur lui-même, et sur lequel se forme ce paradoxe en vertu duquel des processus hautement formalisés produisent des résultats perceptifs qui sont au-delà et en dehors des systèmes d'attentes connus et partagés.

Ainsi, tous les matériaux sont contaminés dans une sorte de multiplication hyper-extensive : les sons d'instruments acoustiques, d'autres sons d'objets quotidiens improbables, ainsi que les sons émergents des modèles eux-mêmes, tout en conservant leur idiomaticité intacte, coexistent sous le signe de ce théâtre de l'imperfection.

Il semble donc que le processus de virtualisation, évoqué au début de cette section, ainsi que dans l'introduction de ce chapitre, soit arrivé à son terme, non pas selon un parcours linéaire, mais plutôt selon un parcours réticulaire et circulaire qui semble rappeler la métaphore du rhizome de Deleuze.

De cette façon, les modèles physiques sont insérés, à l'intérieur de la production examinée, dans les différents lieux possibles des processus de création, selon cette multiplicité rhizomatique constituée par l'émergence de directions différentes, avec des rebonds inattendus, des configurations habituelles et d'autres moins prévisibles, donnant lieu à de nouvelles articulations, de nouvelles syntaxes et de nouveaux paramètres qui enrichissent et/ou redéfinissent les langages, jusqu'à arriver à des procédures propres au domaine numérique qui engagent les auteurs dans de nouvelles solutions. La multiplicité et la multidirectionnalité des parcours possibles semblent donc être le trait distinctif de cette production, qui, dans les nombreux exemples rencontrés, et plus encore dans la vision détaillée des trois études de cas, témoigne de la mesure dans laquelle ces techniques ont été pleinement assimilées au *know-how* des compositeurs.

Conclusions générales

En partant de l'étude des techniques de modélisation, on a tenté de montrer, à travers les différentes perspectives d'observation adoptées au cours de ce travail — et, en particulier, l'élaboration du modèle et ses retombées performatives, jusqu'à sa constitution en langage —, comment les différents modèles de représentation de la source sonore ont ouvert un champ artistique particulier, constituant une lutherie virtuelle diversifiée au potentiel créatif fertile. Une lutherie en constante innovation et redéfinition, qui a commencé l'expérimentation de nouveaux arrangements performatifs, déplaçant l'axe de la recherche artistique dans le domaine électroacoustique du son à l'exploration compositionnelle d'instruments/objets virtuels et des gestes, jusqu'à l'élaboration d'une véritable *pensée physique* fondée sur des concepts physiques, tels que l'énergie, les ondes, le mouvement, la force, etc. : un changement de paradigme qui présuppose la création d'un nouveau paradigme pour la représentation de la source sonore. Il s'agit d'un changement de paradigme qui présuppose une disposition mentale totalement nouvelle, capable de devenir un terrain de rencontre pour des champs d'expérience également très éloignés des compétences artistiques habituelles, prérogative essentielle pour une utilisation efficace, authentique et structurelle des modèles dans le processus de composition.

La littérature examinée couvre une période de temps qui va des premières expériences des années 70 à l'analyse de quelques exemples qui atteignent le seuil de l'actualité, en essayant ainsi de témoigner des phases plus nettement identitaires et représentatives de l'évolution des techniques de modélisation. En ce sens, l'accent a été maintenu sur la période centrale de l'intervalle chronologique choisi/identifié, qui a vu fleurir des initiatives synergiques, avec des équipes multidisciplinaires — composées d'informaticiens, d'ingénieurs, de compositeurs, de musiciens et de physiciens — impliquées dans le développement de techniques et dans l'exploration de leur impact sur les processus compositionnels. En fait, il convient de souligner que les utilisations les plus significatives de la modélisation dans la sphère artistique proviennent encore de domaines de recherche artistico-scientifique impliquant différents professionnels en synergie, même si, avec l'avènement de nouvelles potentialités et de nouvelles interrelations matériel/logiciel, même des compositeurs individuels possédant des

compétences informatiques approfondies ont pu apporter des contributions originales à leur développement.

Dans l'ensemble, cependant, si l'implémentation des modèles dans des environnements de programmation plus généraux, au moyen de bibliothèques ou même de la STK, a d'une part favorisé la diffusion de l'utilisation de ces techniques dans les pratiques compositionnelles, elle a d'autre part inhibé, au moins partiellement, leur développement personnalisé. Ces implémentations, au cours des vingt dernières années, se sont ramifiées, entrelacées, greffées et 'confondues' dans la prolifération des chemins possibles au sein des environnements informatiques actuels — le langage FAUST est exemplaire en ce sens — de sorte que leur utilisation dans les sphères de la création apparaît désormais plus fluide, dans le cadre de processus de synthèse et d'élaboration de plus en plus interdépendants et évolutifs.

Le répertoire examiné a témoigné d'un échantillon large et varié de modèles, de contextes performatifs et d'élaborations linguistiques et formelles qui, dans leur ensemble, ont répondu de manière exhaustive aux questions initiales de cette recherche : les modèles physiques, ou, si l'on veut, les instruments virtuels physiquement informés, ont construit leur propre vocabulaire, un vocabulaire qui est entré dans la recherche artistique et musicale d'aujourd'hui en générant de nouveaux champs d'expression et de nouvelles formes d'articulation des différents langages.

L'ensemble de la littérature examinée a effectivement démontré la grande variété des modèles et des résultats obtenus : de l'approche du guide d'ondes visant à comprendre, en premier lieu, la mécanique de la réalité sonore existante, pour ensuite procéder à son altération ; au parcours idéalement opposé d'une technique, comme celle de l'interaction de masse, qui, étant beaucoup plus prédisposée à une utilisation créative immédiate dans le virtuel, s'avère, au contraire, beaucoup plus complexe à utiliser lorsqu'on veut l'appliquer à la reproduction d'objets existants. Deux tendances qui, en polarisant des résultats opposés, témoignent de l'interrelation dialectique créée entre la conceptualisation du modèle, qui représente une abstraction sélective de la réalité, et la création artistique, qui est également structurée par rapport aux caractéristiques ontologiques de l'objet/instrument avec lequel elle est appelée à interagir.

C'est un lien que nous avons essayé de montrer en reconstruisant une image globale aussi complète que possible, même si nous sommes conscients qu'il reste

beaucoup à rechercher et à comprendre sur la relation complexe et en constante évolution entre la technique et la créativité, sans compter que les techniques, les pratiques et les projets étudiés peuvent être lus dans le contexte plus large des réalités virtuelles qui élargissent et transforment notre façon d'expérimenter le monde, ouvrant des espaces et des relations à expérimenter et à explorer.

En élargissant notre vision, nous pouvons observer que ce qui a été fait, ne serait-ce que dans le domaine de la créativité musicale, peut constituer un fragment de ce qui sera possible à l'avenir : les techniques de modélisation physique dans le domaine musical n'ont pas encore atteint leur pleine maturité, et elles n'ont pas non plus démontré leur invasivité dans les domaines les plus divers de la réalité virtuelle. En fait, les expériences de ces dernières années n'ont fait que préfigurer les développements possibles de l'interaction homme-machine qui pourraient faire l'objet de pratiques musicales futures. En tout état de cause, chaque aspect analysé ne peut que s'inscrire dans le contexte plus large des pratiques de la réalité virtuelle, qui caractérisent, de manière identitaire et en constante redéfinition, la pensée, la connaissance et la créativité contemporaines.